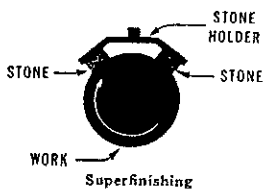
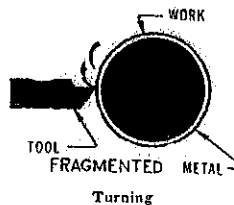
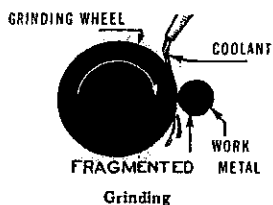
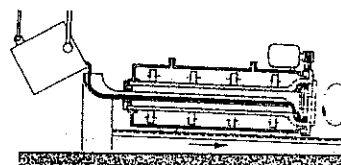
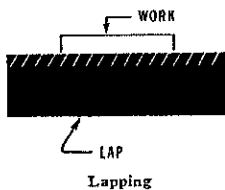
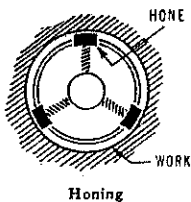


MISE A FORME DES MATERIAUX

première partie



J.F. DEBONGNIE

Avertissement

Les figures de ce cours sont, pour la plupart, empruntées à divers ouvrages repris dans la bibliographie du tome II de ce cours et qu'il nous est impossible de citer ici. Nous tenons cependant à exprimer notre gratitude spéciale au professeur LEROY de la Faculté Polytechnique de Mons, qui a très aimablement mis à notre disposition la remarquable collection de figures didactiques qui servent d'ossature à son propre cours.

Je tiens à remercier Madame C. PIFFET et Monsieur M. BERNARD qui ont réalisé la frappe, les figures et la mise en page du présent volume.

J.F. DEBONGNIE

1. GÉNÉRALITÉS

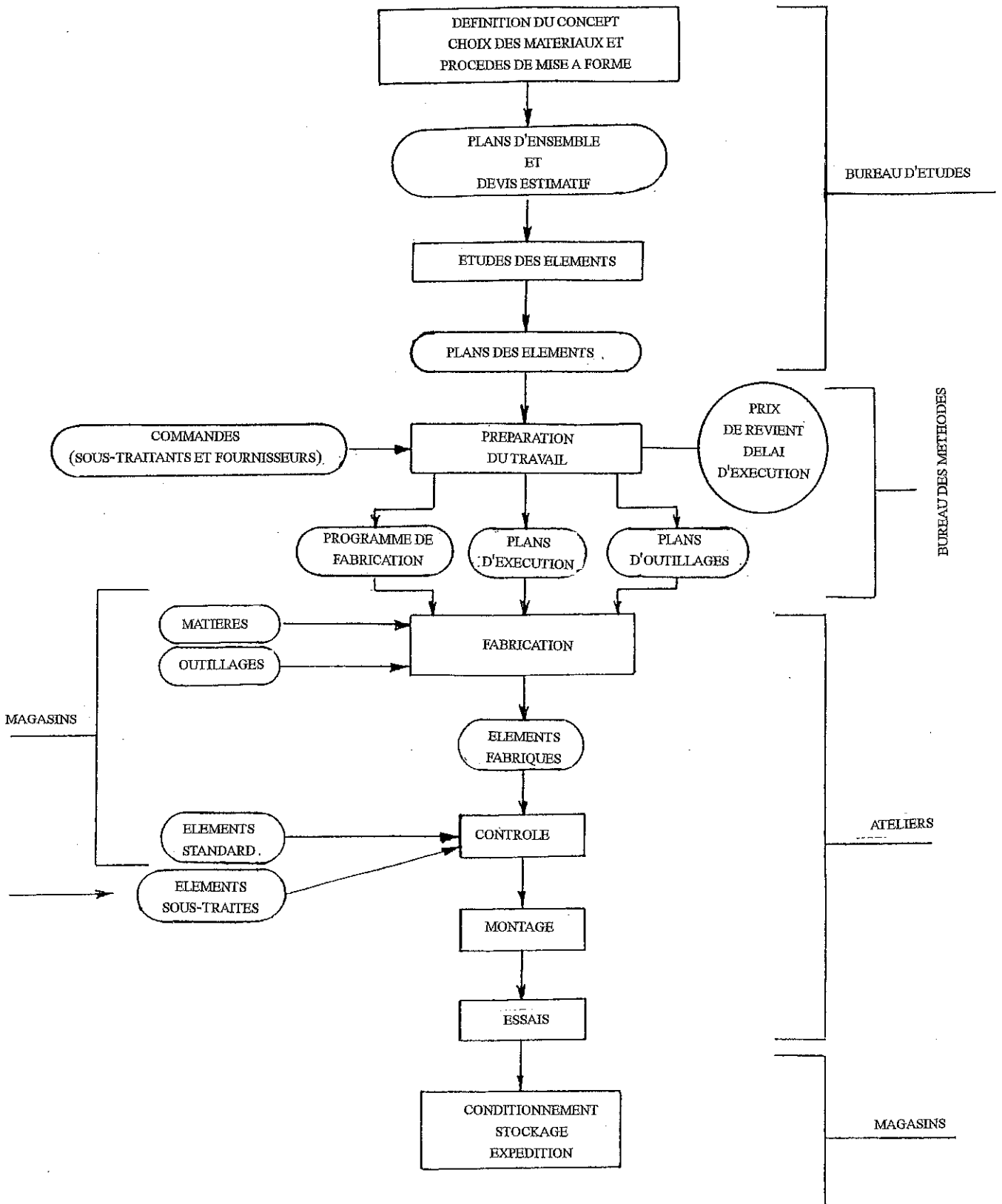


Fig. 1

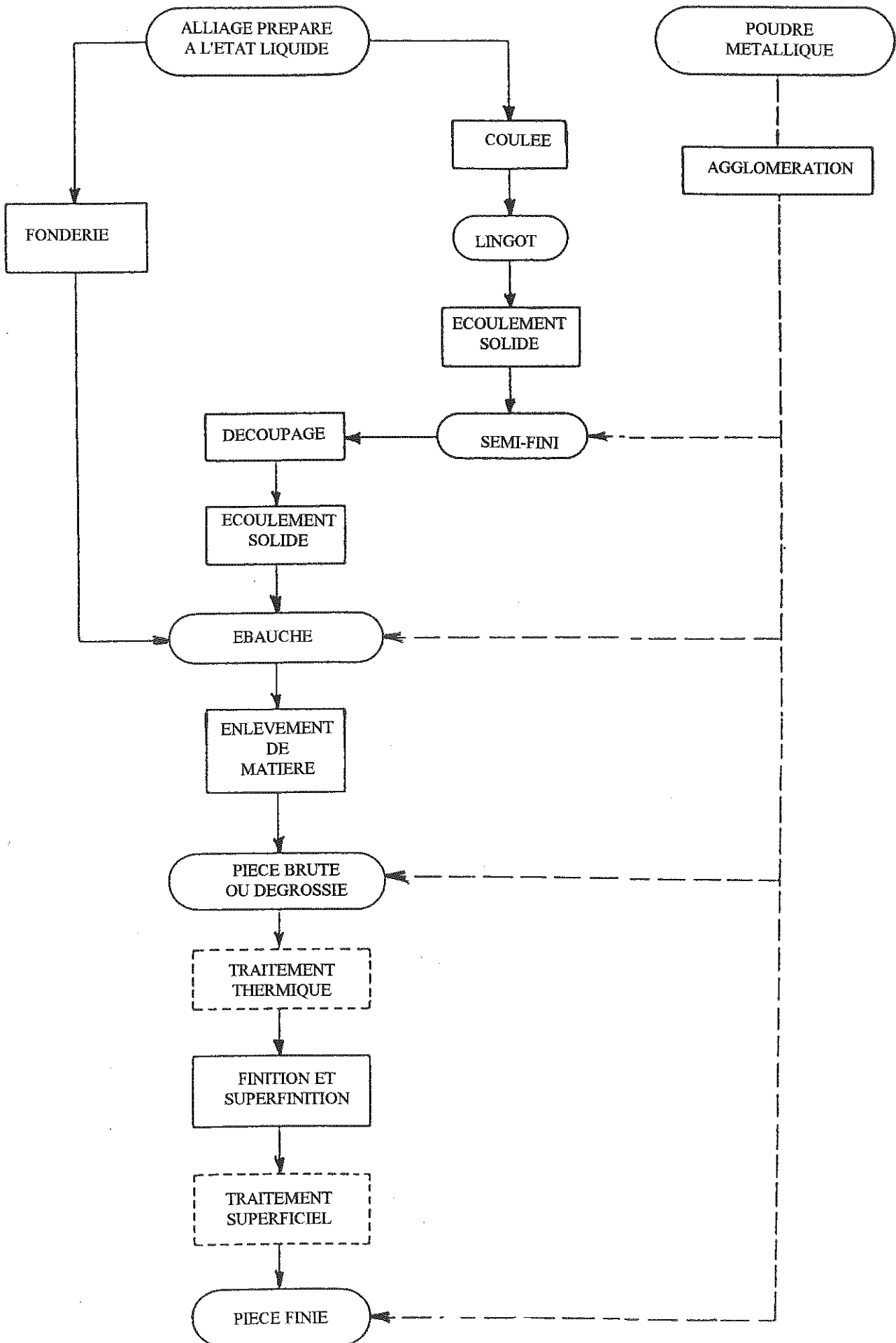
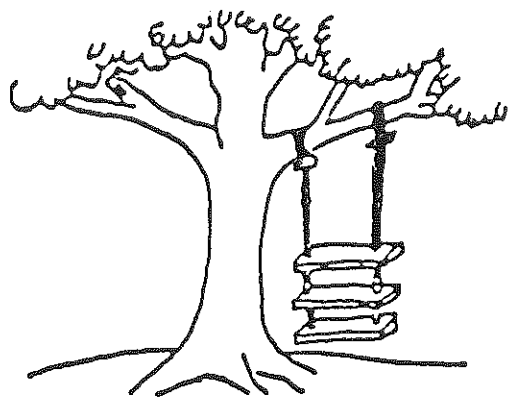
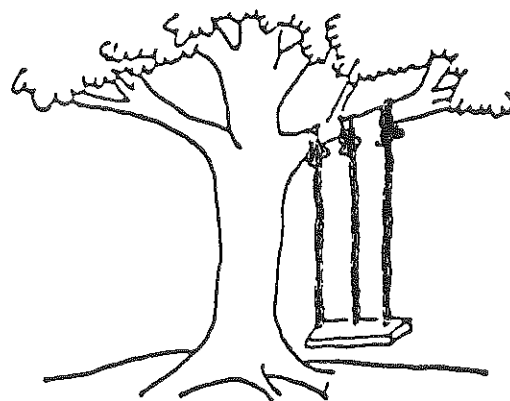


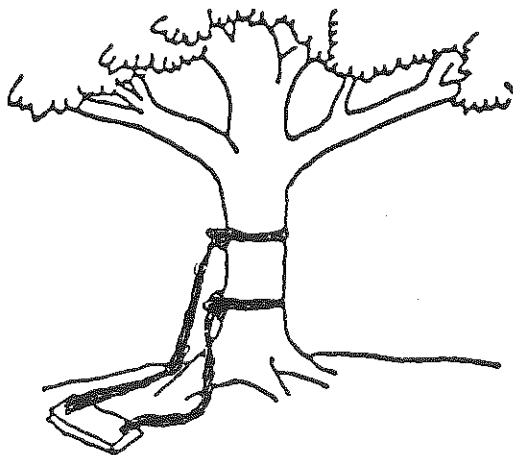
Fig. 2



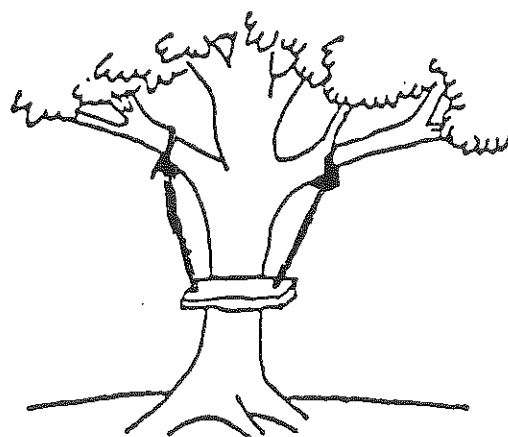
MARKETING's understanding



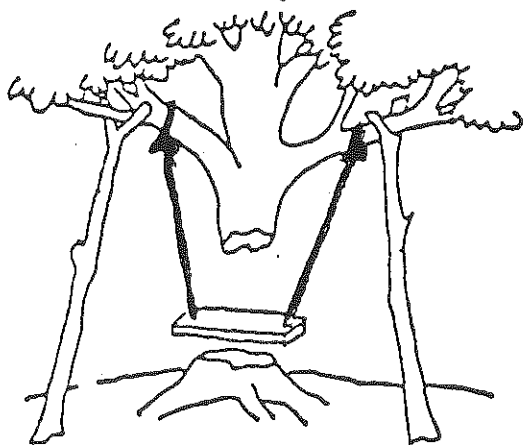
As specified in the project request



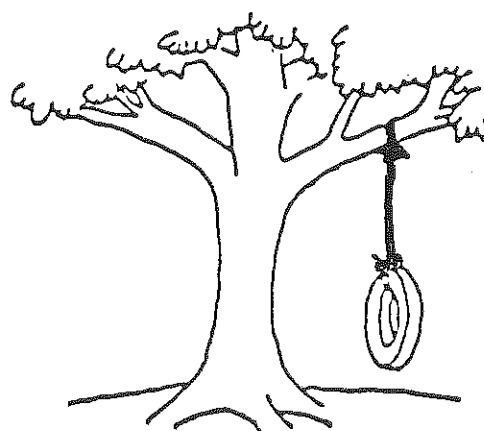
As designed by the senior analyst



As produced by production



As installed at the user's site



What the user wanted
author unknown

Fig. 3

La figure 4 ci-contre pose de manière caricaturale le problème de la *communication*. On peut dire qu'en l'occurrence, l'observation se situe à l'intérieur de l'entreprise et suit l'histoire du produit à partir du moment où le service commercial l'introduit dans l'entreprise.

Le cahier des charges est déjà différent : ici se manifeste probablement la politique générale de la maison. Le fait que l'on ait remplacé la multiplication des planches par celle des cordes semble refléter un grand sens de la sécurité.

L'étape de la conception marque un tournant décisif : quelque théoricien étheré aura eu une illumination ! (noter le sarcasme : *senior analyst*).

Les producteurs, gens pratiques, s'empressent d'essayer d'arranger les choses. Mais n'ayant de dialogue qu'avec le bureau d'études, ils ne sont pas parvenus à remettre les choses en ordre.

Enfin, l'installateur, bien conscient du problème – il travaille sur le site de l'utilisateur –, finit par trouver une solution presque satisfaisante, mais ô combien boiteuse.

2. SIDÉRURGIE

CLASSIFICATION DES ALLIAGES

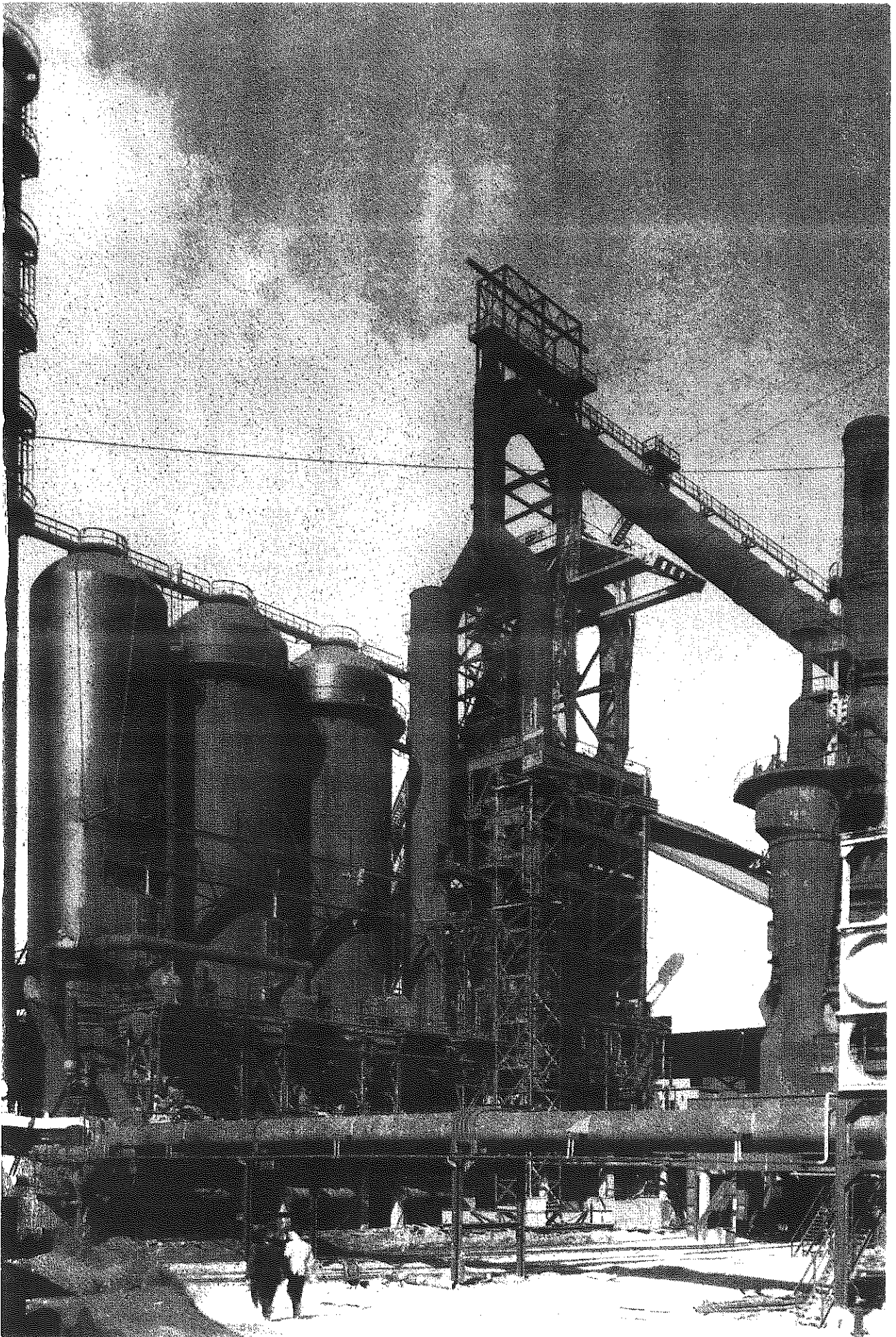
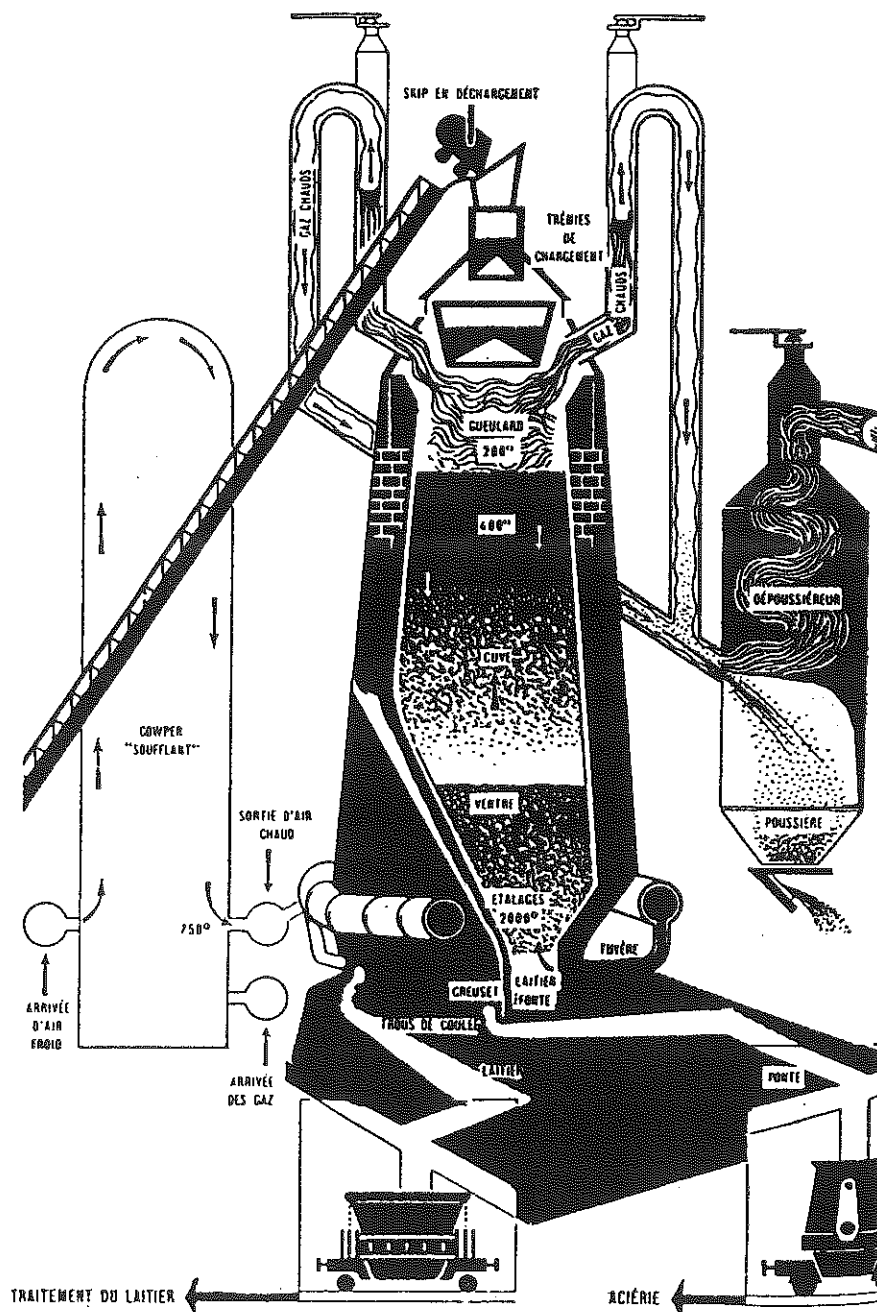


Fig. 4

Nous donnerons dans les pages qui suivent un très bref aperçu du processus sidérurgique. Notre but est essentiellement d'illustrer les appareils couramment utilisés.

La figure ci-contre est une photo de haut-fourneau. Le haut-fourneau proprement dit est la grande tour surmontée de tuyaux. Les trois tours cylindriques à son côté sont les cowpers, destinés à réchauffer l'air. On voit assez mal sur cette photo le dispositif de chargement.



SCHEMA D'UN HAUT FOURNEAU. — L'air chaud insufflé à la base du haut fourneau traverse la masse de coque et de minerai dont il entretient la combustion. A 2 000°, la fonte liquide coule dans le creuset, tandis que le laitier contenant la chaux et les impuretés surnage. On les recueille alternativement.

Fig. 5

Fonctionnement du haut-fourneau

Le minerai de fer est un oxyde de fer. Il est réduit par le CO produit par la combustion de coke. Le fer se charge inévitablement de carbone : on obtiendra donc de la *fonte*.

Le coke et le minerai de fer sont chargés alternativement par les trémies situées au sommet du haut-fourneau. La combustion est entretenue par un souffle d'air chaud venant par des tuyères. Pour réchauffer l'air, on récupère la chaleur des gaz chauds sortant du gueulard. Ces gaz sont d'abord dépoussiérés, puis amenés dans un des cowpers, où ils sont brûlés. Lorsque le cowper est bien chaud, on y fait passer l'air; les gaz sont alors dirigés vers un second cowper. Le fonctionnement est donc alternatif. Le troisième cowper sert de réserve.

La fonte et le laitier sont recueillis au creuset.

La plus grande partie de la fonte est destinée aux aciéries. Le reste va aux fonderies.

Quant au laitier, il servira à la fabrication de ciments, d'agglomérés, ou sera utilisé après concassage, comme ballast des voies ferrées. Les impuretés inutilisables sont déposées sur des crassiers.

TRANSPORT DE LA FONTE LIQUIDE. — La fonte peut être maintenue liquide assez longtemps durant son transport, ce qui permet d'économiser sensiblement le combustible. Des wagons spéciaux ont été conçus sur le modèle des bouteilles isothermes, toutes proportions gardées, bien entendu.

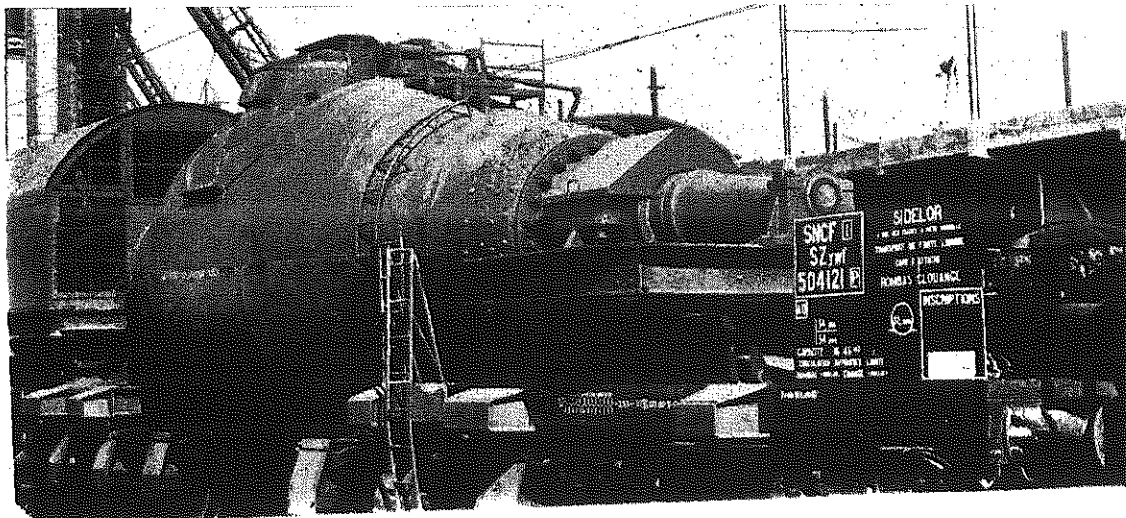


Fig. 6

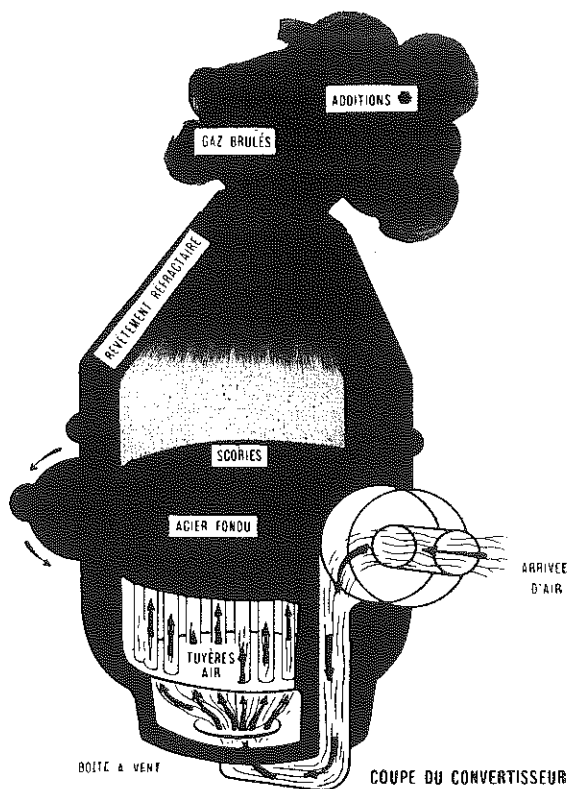


SCHÉMA D'UN CONVERTISSEUR. — Le convertisseur est une grande poche d'acier garnie à l'intérieur d'un revêtement réfractaire basique, dans lequel la fonte, à laquelle est ajoutée de la chaux, est soumise à un violent soufflage d'air enrichi en oxygène ou d'oxygène pur.

Fig. 7



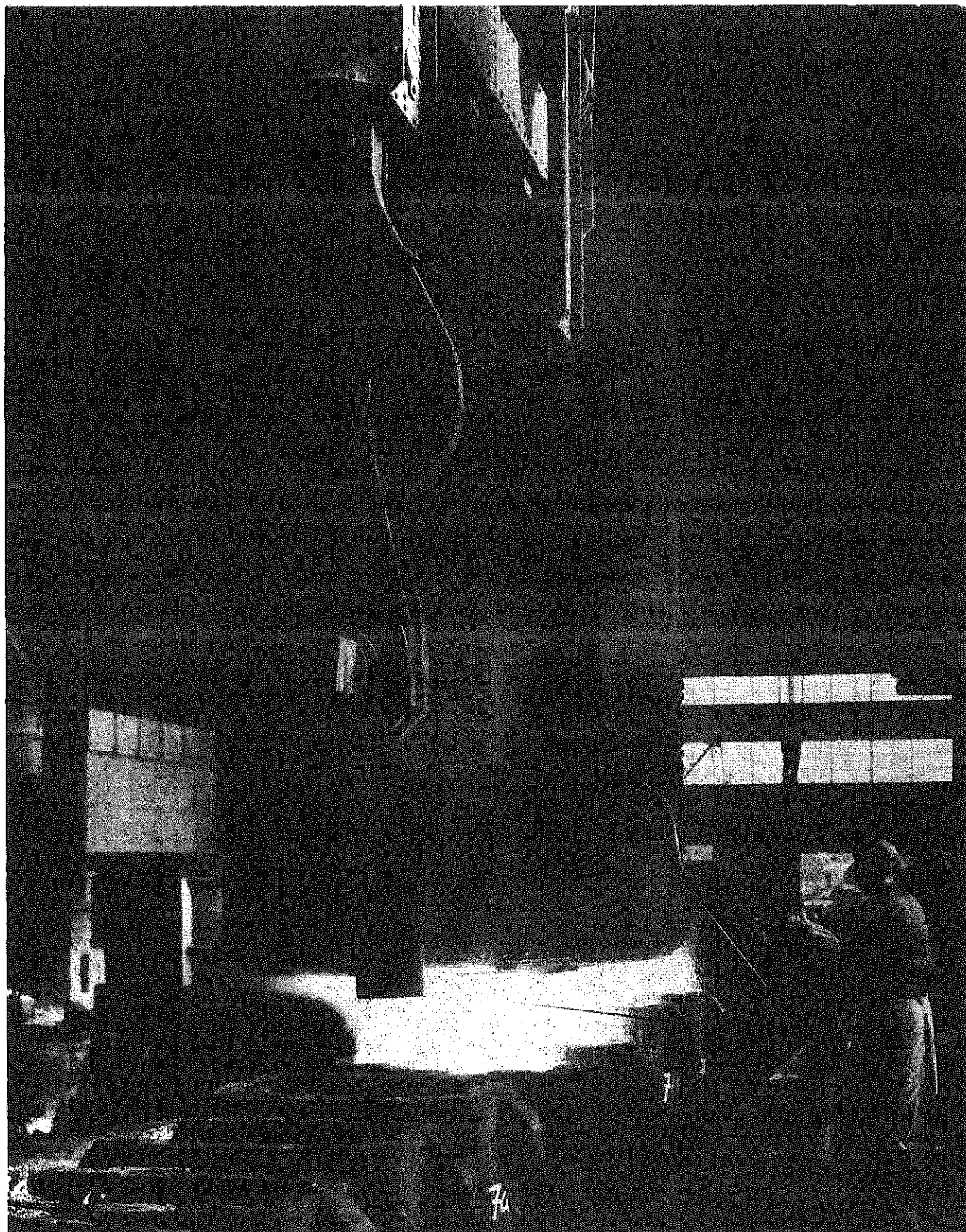
CONVERTISSEUR EN COURS DE SOUFLAGE. — *Tout d'abord, le silicium contenu dans la fonte brûle au contact de l'air en produisant des gerbes d'étincelles. La flamme s'allonge ensuite et la masse est brassée par l'air, c'est la combustion du carbone. Le phosphore est alors éliminé au milieu des nuages de fumées rousses d'oxyde de fer.*

Fig. 8

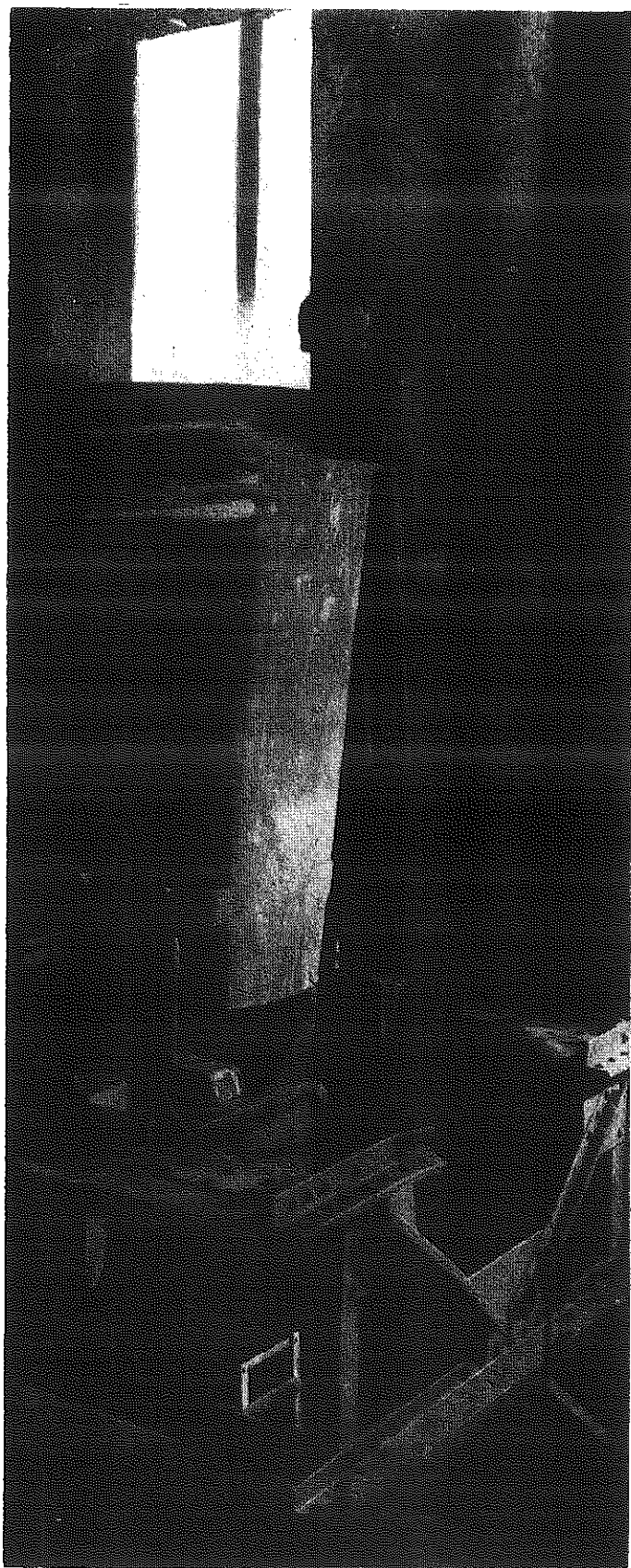
OUVRIER AU FOUR MARTIN. — L'opération d'affinage au four Martin est beaucoup moins rapide qu'au convertisseur. Le fondeur peut la contrôler et la conduire à tout moment grâce à des additions convenables. Il élimine à l'aide d'un long crochet les scories qui se forment à la surface du métal liquide et qui contiennent les impuretés.



Fig. 9

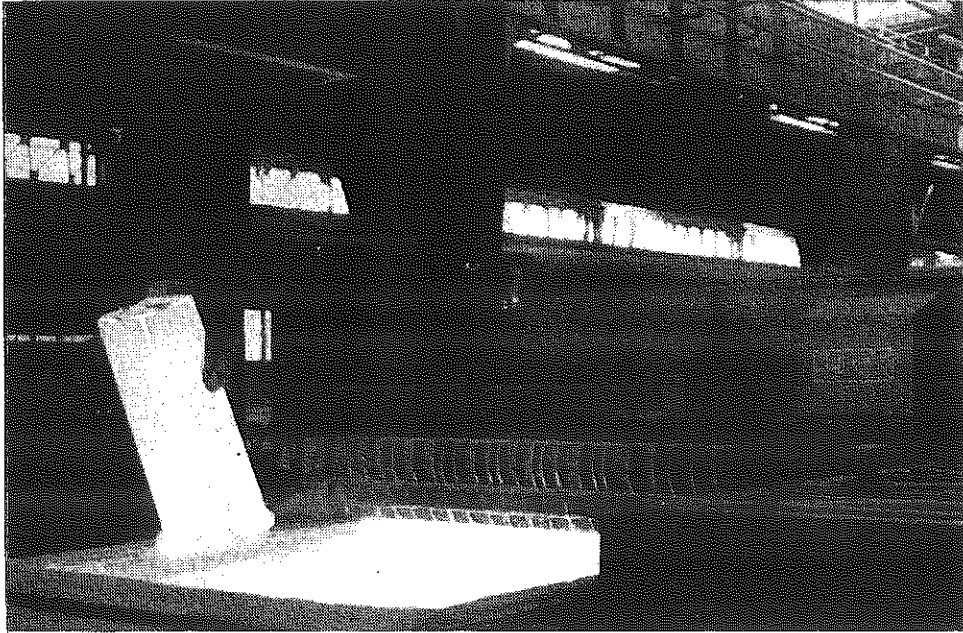


COULÉE DE L'ACIER EN LINGOTS. — L'énorme poche d'acier est dirigée au-dessus des lingotières, moules en fonte aux parois épaisses, où le métal va se refroidir en lingots. Ces lingots affectent généralement la forme de prismes dont la base supérieure, carrée ou rectangulaire, est légèrement plus petite que la base inférieure, ce qui en facilite le démoulage.

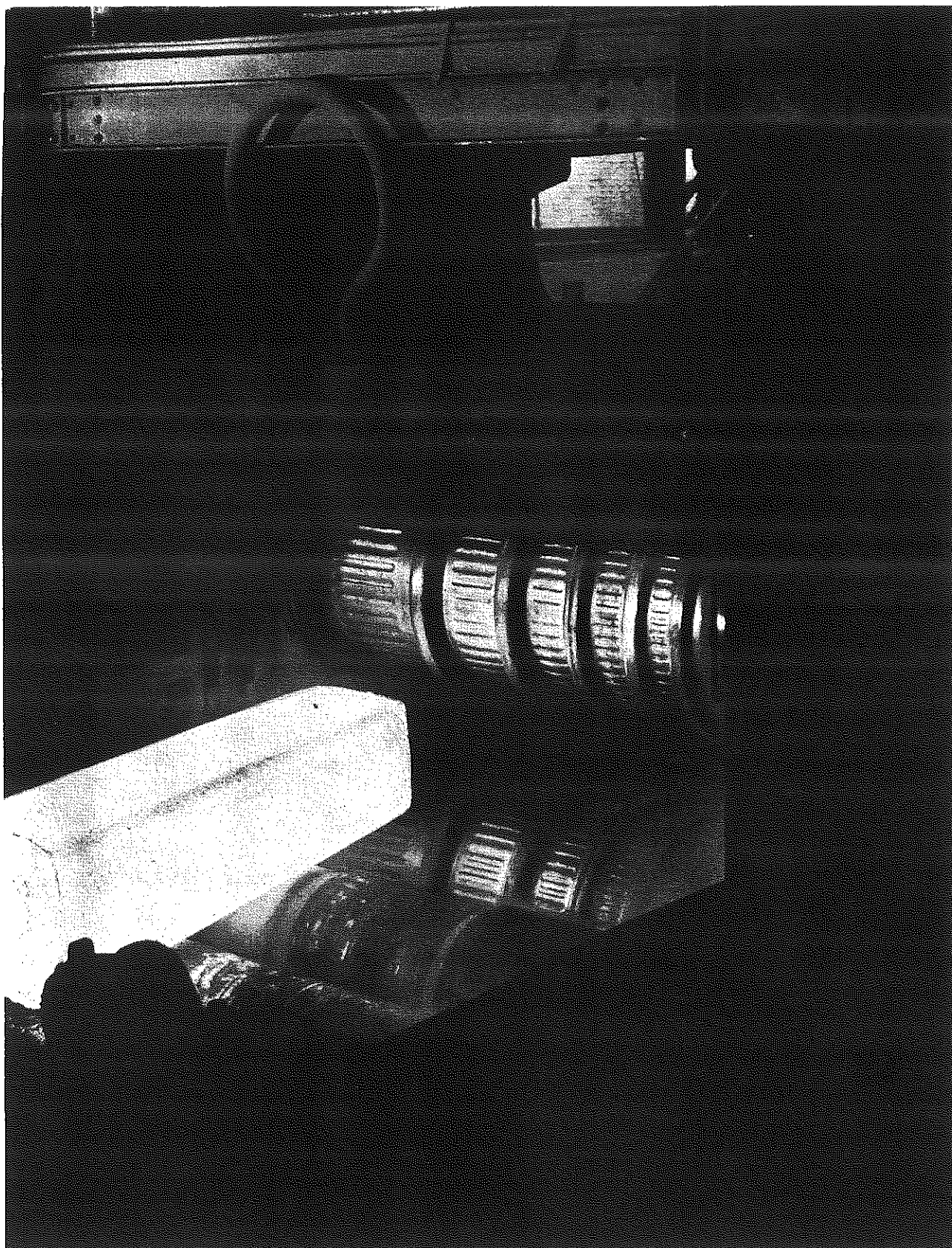


DÉMOULAGE DES LINGOTS. — Une fois solidifiés, les lingots sont démoulés et vont être laminés ou forgés. Les pinces du pont « strippeur » soulèvent la lingotière par ses oreilles, laissant le lingot démoulé sur son chariot. Un poinçon, visible ici à la partie supérieure, s'abaisse et vient appuyer sur le lingot.

Fig. 11

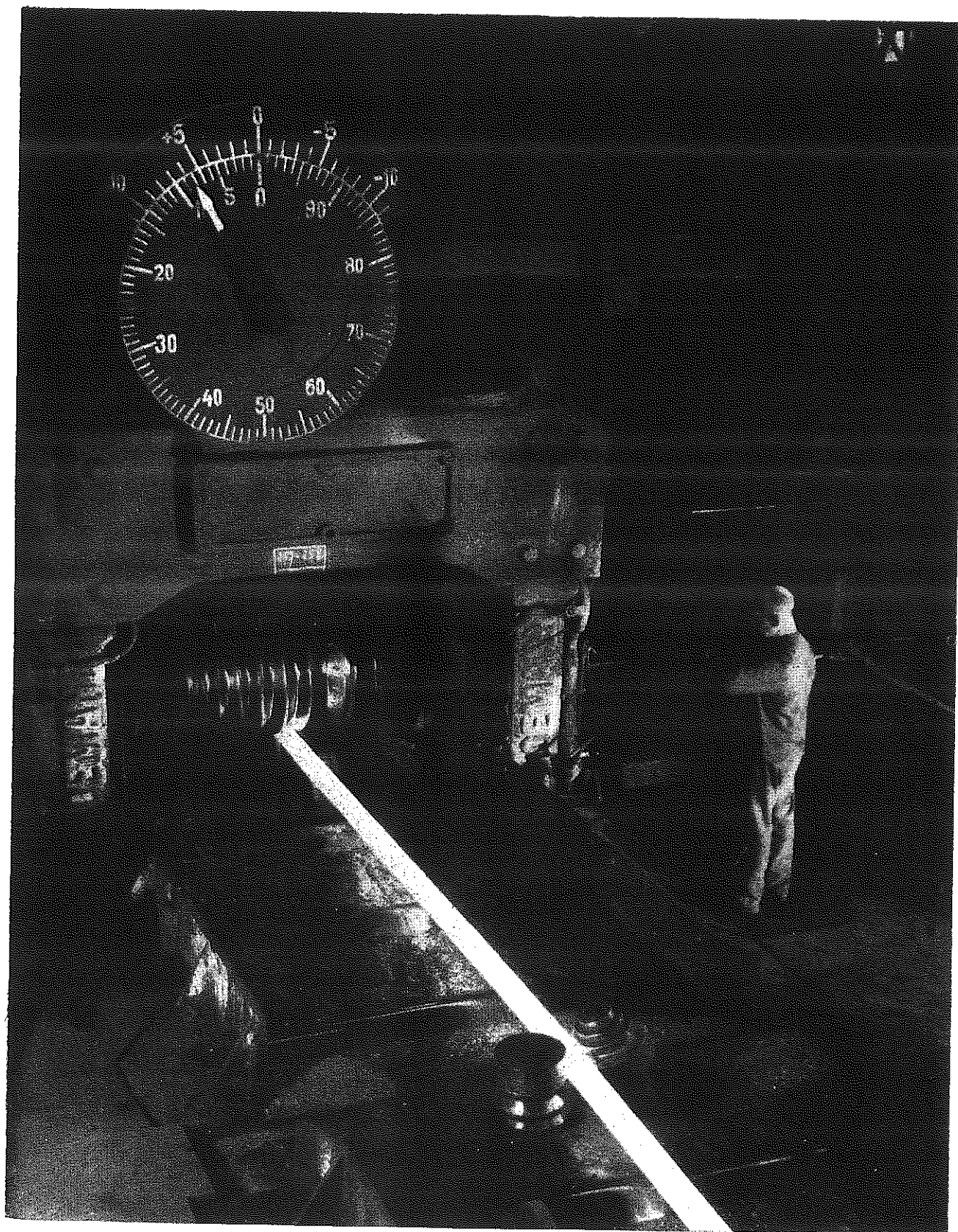


RÉCHAUFFAGE DES LINGOTS. — *Avant qu'il soit procédé aux opérations de laminage les lingots subissent un réchauffage dans des fours spéciaux, fours Pits, où leur température est rendue homogène.*



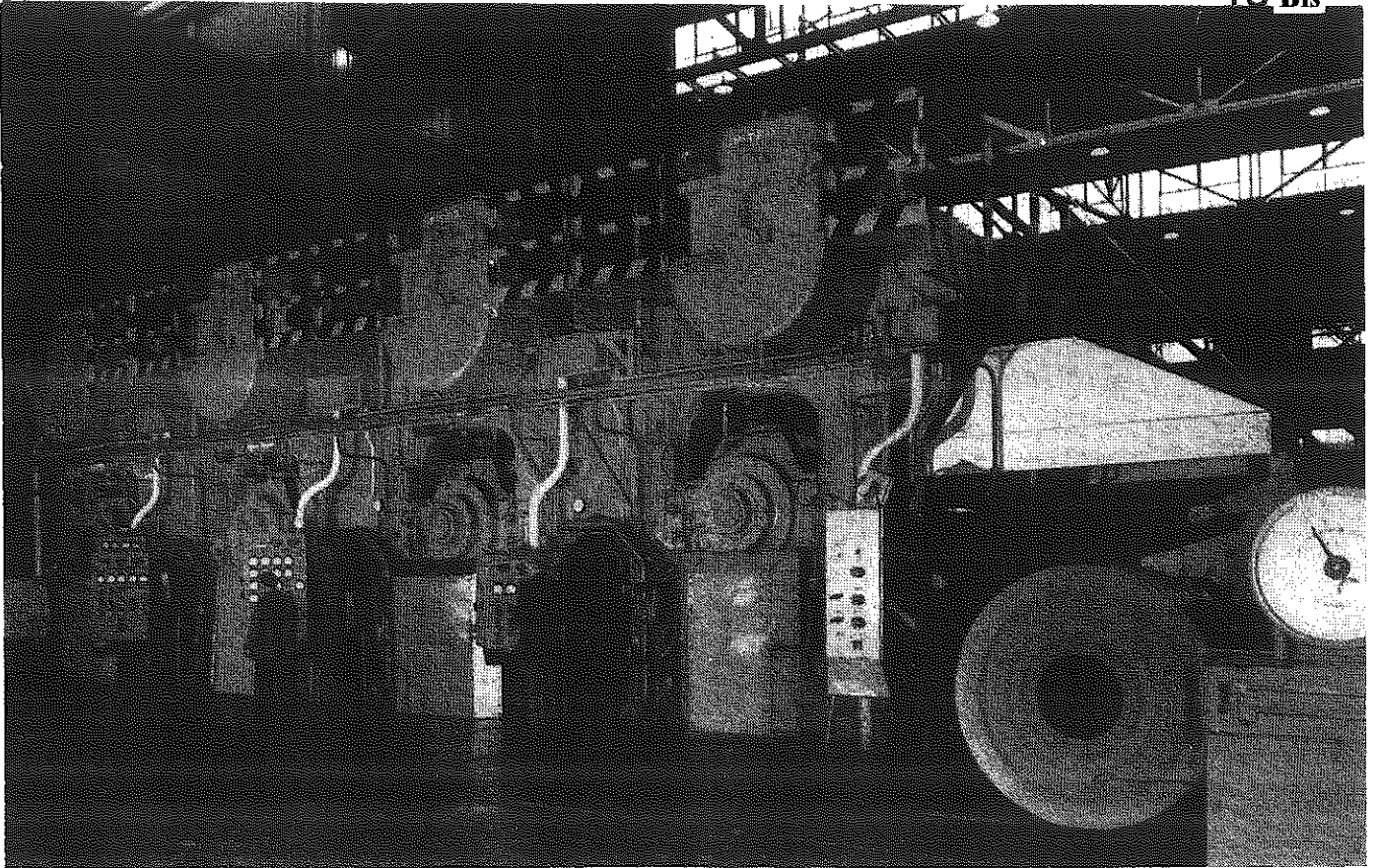
BLOOMING-SLABBING. — On voit très bien les cannelures des cylindres du blooming qui donneront au lingot sa première forme, soit de bloom (à section carrée), soit de brame ou de slab (à section rectangulaire).

Fig. 13



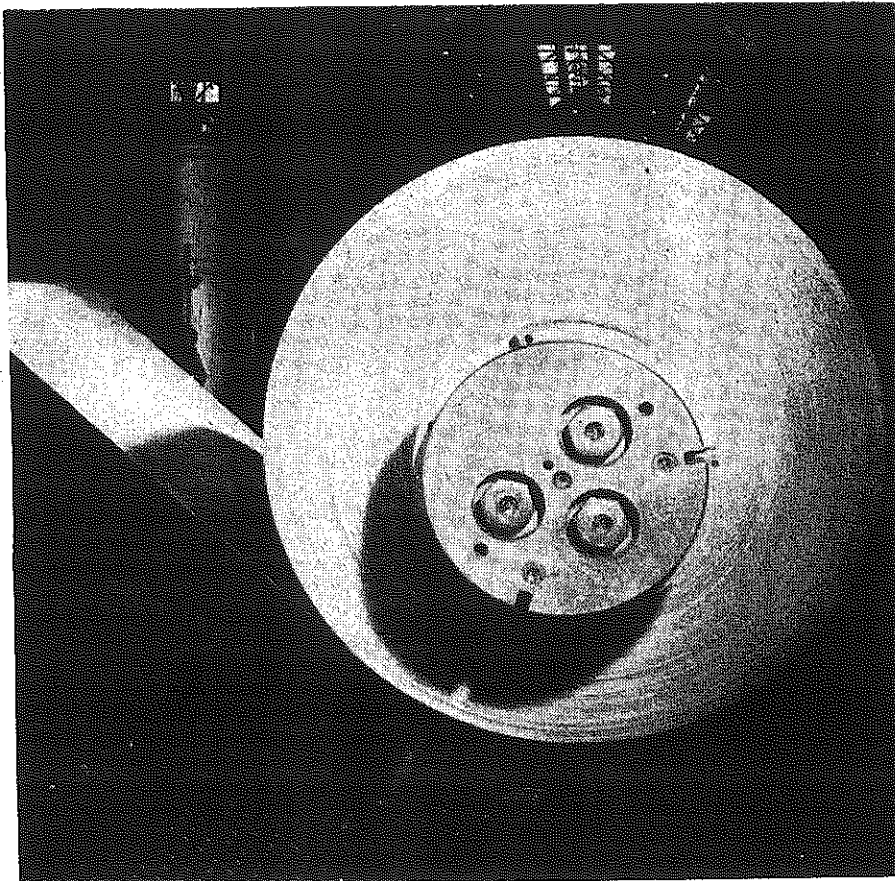
TRAIN A BILLETES. — *Sortie du métal d'une des cages d'un train à billettes. C'est à partir des billettes que sont produits le fil, les petites cornières et les feuillards.*

Fig. 14



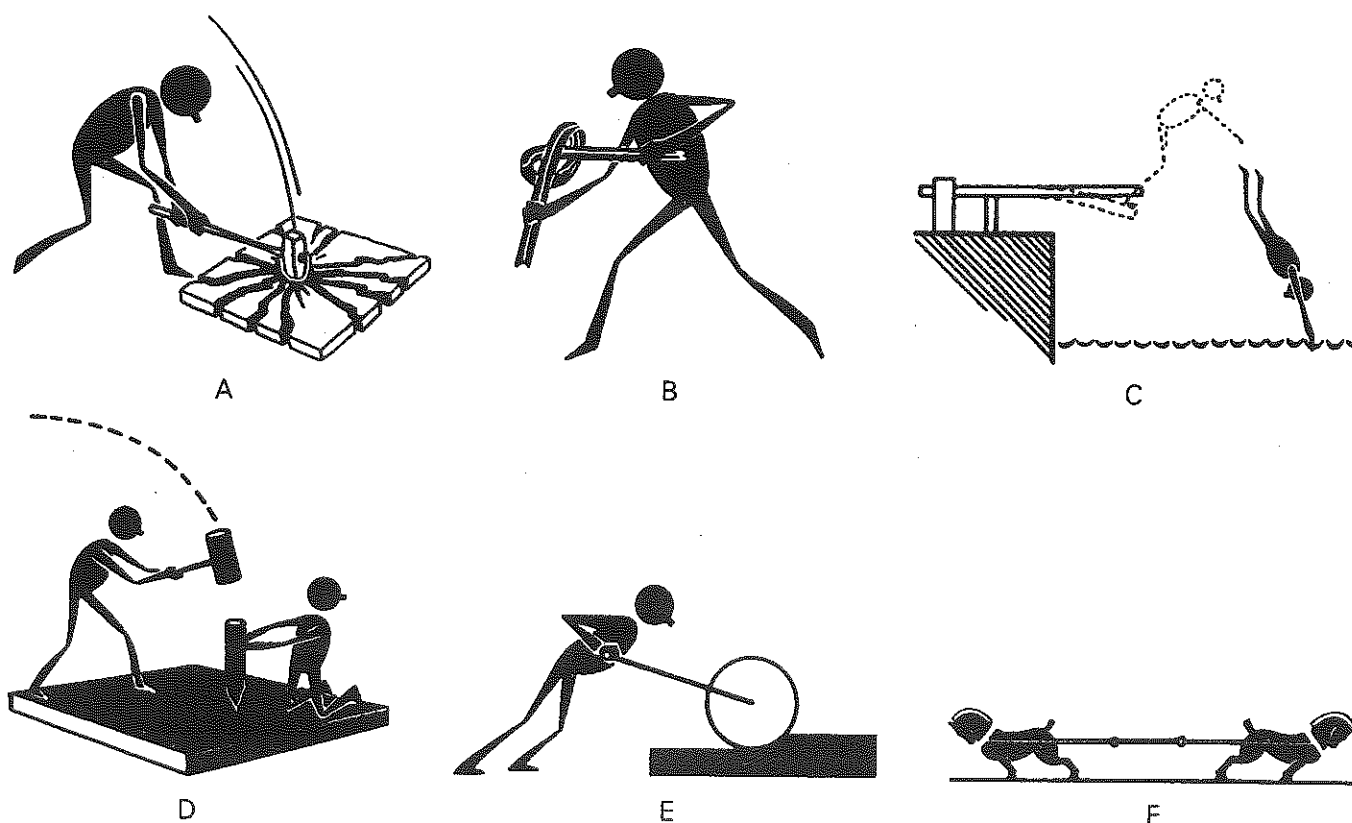
LAMINAGE A FROID. — *Le laminage à froid est une technique très moderne pour l'obtention des tôles fines : ce train continu à quatre cages, entièrement automatique, est le dernier mot du progrès.*

Fig. 15



BOBINE DE TÔLE. — *A la sortie du train continu de laminage à froid, la tôle s'enroule en bobine à une vitesse pouvant atteindre 70 à 90 kilomètres à l'heure.*

Fig. 16



- A. Un métal *fragile* supporte mal la flexion et se brise aisément.
 B. Un métal *ductile* se déforme aisément.
 C. Un métal *élastique* reprend sa forme initiale dès que la charge est supprimée.
 D. Un métal *dur* résiste à la pénétration.
 E. Un métal *malléable* est aisé à mettre à forme.
 F. La *contrainte de rupture* se mesure par un essai de traction.

Fig. 17

- La *ténacité* est mesurée par

$$W = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon$$

- La *résilience* est l'aptitude de résister au choc

on mesure l'énergie W en J

$$\text{ou } \frac{W}{S_0} \text{ en J / cm}^2.$$

S_0 = section initiale à fond d'entaille

= essais comparatifs !

Mouton de Charpy

$$\begin{aligned} \text{Energie de départ} &= Mg R (1 - \cos \alpha_0) \\ \text{Energie résiduelle} &= \underline{Mg R (1 - \cos \alpha_f)} \\ \text{Energie rupture} = W &= Mg R (\cos \alpha_f - \cos \alpha_0) \end{aligned}$$

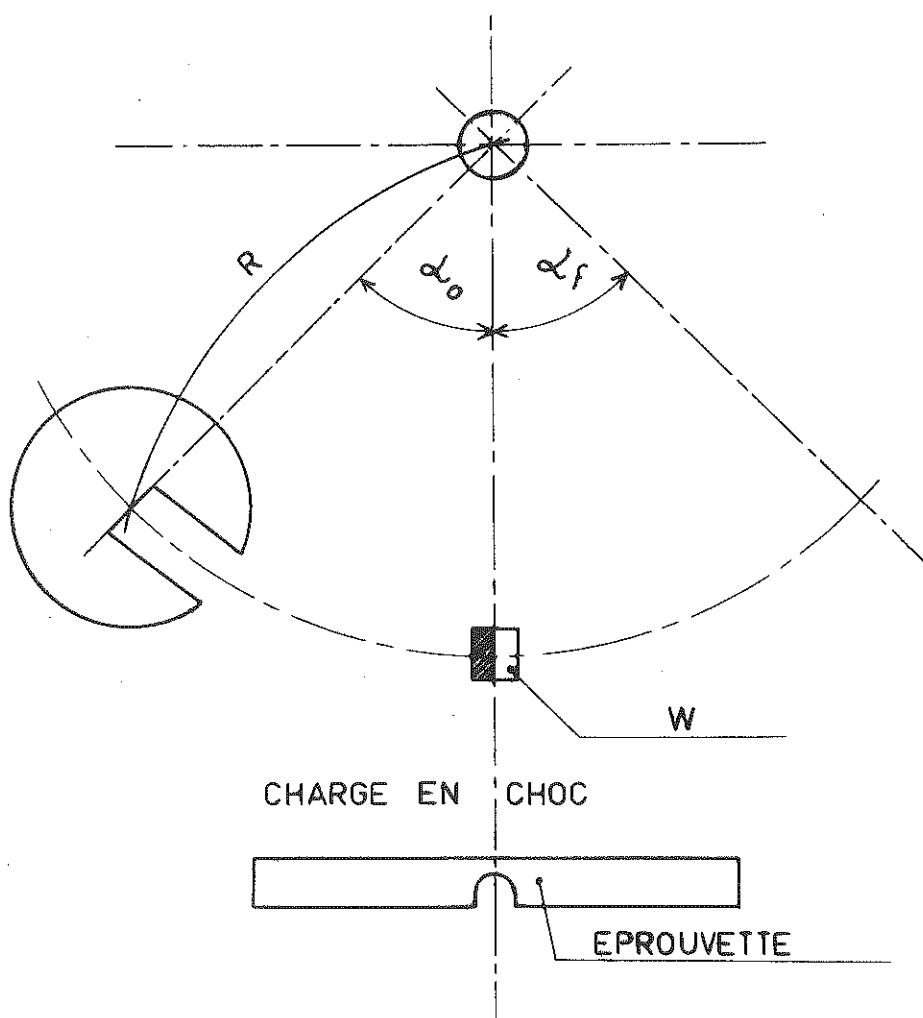


Fig. 18

	TYPE	1	2	3	4	5	à	8	9.1	9.2	10	11	DESIGNATION	
Classification selon la résistance	Non allié	Acier résistant au vieillissement, $R_m = 420$ MPa, haute limite élastique, haute résistance, normalisé.		A	St42	St42			.6		N		AST42.6N	
		Acier Thomas, $R_m = 370$ MPa	T		St37	St37							TSt37	
Classification selon la composition chimique		Fonte grise (lamellaire) $R_m = 200$ MPa	GG-		20	20							GG-20	
		Acier Siemens-Martin acide, 0,35% C, amélioré pour $R_m = 700$ MPa		M	C35	C35					V	70	MYC35V70	
		Acier à outils à 1% C, qualité 2, recuit			C100	C100					W2	G	C100W2G	
		Acier électrique basique à 0,13% C, 1,25%Cr, 0,3%V, bonne résistance au fluage, amélioré.		E	B	13CrV53	13CrV53			.8		V		EB13CrV53.8V
		Acier électrique coulé, 0,25% C, 1,25% Cr, 0,6% Mo, amélioré, recuit de relaxation, pour $R_m \approx 650$ MPa	GS-	E		25CrMo56	25CrMo56					V+S	65	GS-E25CrMo56V+S65
Fortement allié		Acier inox 0,10% C, 0,18% Cr, 8% Ni, amélioré			X	10CrNi188	10CrNi188				V		X10CrNi188V	
		Alliage de Ni et Al fondu	G-			NiAl	NiAl						G-NiAl	

Exemples tirés de KLEIN -- "Einführung in die DIN-NORMEN", Teubner(Stuttgart) & Beuth (Berlin & Köln), 8.Auflage, 1980

Rapidement, disons que l'on distingue

- les aciers de construction définis par leurs propriétés mécaniques.
Leur composition n'étant pas garantie, ils sont impropres aux traitements thermiques.

$$\left. \begin{array}{l} \text{DIN: St37} \\ \text{AFNOR:A 37} \end{array} \right\} : \text{acier } R_m = 370 \text{ MPa}$$

- les aciers au carbone, de composition garantie, mais non alliés

$$\left. \begin{array}{l} \text{DIN : C45: acier à 0,45\% de C} \\ \text{AFNOR:XC48: acier à 0,48\% de C} \end{array} \right\}$$

- les aciers faiblement alliés : - de 5 % d'éléments d'alliage

DIN : 100 Cr 6 : acier à 1 % de C
1,5 % de Cr (le chiffre est le %,

$$\left. \begin{array}{l} \times 4 \text{ pour Si, Mn, Ni, Cr, Co, W} \\ \times 10 \text{ pour autres} \end{array} \right\}$$

AFNOR : 100 C 6 : même acier

$$\left. \begin{array}{l} \times 4 \text{ pour Si, Mn, Ni, Cr, Co} \\ \times 10 \text{ pour autres sauf Bore} \\ \times 1000 \text{ pour Bore} \end{array} \right\}$$

symboles AFNOR \neq symboles chimiques :

C = Cr, D = molybdène (!), N = Nickel, ...

- les aciers fortement alliés

DIN : X 6 Cr Ni 18.08
AFNOR : Z 6 C N 18.08

Groupe 1 : propre aux métaux coulés

G- : coulé
 GG- : fonte grise lamellaire
 GH- : fonte blanche
 GS- : acier coulé
 GT- : fonte malléable (en général)
 GTS- : fonte malléable à coeur noir
 GTW- : fonte malléable à coeur blanc
 ...symboles supplémentaires: K : moulage en coquille Z : coulée eantrifuge
 D : coulé sous pression ex : GGK : fonte lamellaire coulée en coquille.

Groupe 2 : Mode de préparation de l'acier

B : Bessemer
 E : aciérie électrique
 F : four à flamme
 J : four à induction
 LE : four à arc
 M : Martin-Siemens
 PP : Puddlé
 SS : Préparé en vue d'une haute soudabilité
 T : Thomas
 TI : Tiegel
 W : Windfrish
 Y : Acier acide à l'oxygène
 ...symboles supplémentaires: B : basique Y : acide ex : EY : acier électrique acide.

Groupe 3 : Propriétés particulières

A : résistant au vieillissement
 G : haute teneur S ou P
 H : semi-calmé
 K : faible teneur P ou S
 L : supportant l'écrouissage en long
 P : soudable à la forge
 Q : supportant l'emboutissage
 R : calmé
 S : soudable
 U : effervesçant
 Z : étirable
 B : basique
 Y : acide

Remarque: en général, les aciers au carbone sont effervescents pour $C \leq 0,3\%$ et calmés pour $C \geq 0,3\%$.

Groupe 4 : X signifie acier fortement allié, c'est-à-dire contenant un élément d'addition à plus de 5%.

***Groupe 5-8 :

- St = acier non coulé défini par R_m (sans garantie de composition) + indice de qualité facultatif 1,2,3 (qualité avec le nb)
 ex : St 37-2 : acier à 370 MPa, qualité 2
- 5 - C = acier au carbone : éléments d'addition non mesurables ou en quantités inférieures à:
 0,5%Mn ; 0,8%Si ; 0,1% Al ou Ti ; 0,25%Cu ; 0,09%P ; 0,06%S.
- Ck = acier "noble" (Edelstahl) : P, S, qualité très constante, minimum d'inclusions non métalliques, meilleur état de surface.
- 6 Teneur en carbone (en 1/100 de %)
- 7 Eléments d'alliage, par ordre de concentration ou par ordre alphabétique.
- 8 Concentrations a) Aciers X : conc. en %
 b) Faiblement alliés: facteurs multiplicatifs
 { 4 pour Si, Mn, Ni, Cr, Co, W
 (simanicrocow)
 - { 100 pour Ce, P, S, N
 { 10 pour les autres.

℥ : les valeurs sont arrondies à l'unité.

Groupe 9.1 : Exigences particulières pour l'utilisation

CHIFFRE	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
R _{0,2}	x			x		x	x		
Ductilité		x		x	x		x		
Résilience			x		x	x	x		
Résistance chaleur & fluage								x	
Propriétés magn. ou électriques									x

Fig. 20

Groupe 9.2 : Qualité des aciers à outils (Werkzeug = outil)

W1 : Qualité 1 W2 : Qualité 2 W3 : Qualité 3 WS : spécial

Groupe 10 : Traitement thermique

A : Etat de livraison

B : Traité pour haute usinabilité

E : cémenté

G : adouci

H : trempé (en général)

HF : trempé superficielle à la flamme

HJ : trempé superficielle à induction

K : formé à froid

KBK : étiré blanc (à froid)

N : normalisé

NT : nitruré

S : recuit de relaxation

U : non traité

V : amélioré (=trempé & revenu)

Groupe 11 : en liaison avec groupe 10 (R_m/10 obtenue après trait^t therm.)

CLASSIFICATION DIN DES METAUX NON FERREUX

Symbole chimique du métal de base (+ gde conc.), symbole des él. d'addition, chiffres pour les concentrations massiques. Ces chiffres ne sont indiqués que s'il y a risque de confusion. Préfixe G- : voir métaux ferreux.

ex : G-Cu Sn 7 Zn Pb : Cu 83%, Sn 7%, Zn 4%, Pb 6%, coulé.

Remarque: Les Allemands utilisent pour les alliages de Cu un vocabulaire assez spécial:

Messing = CuZn (laiton)

Zinnbronze, Bronze = CuSn (bronze)

Neusilber = CuNiZn (maillechort)

Aluminium-Bronze = CuAl (cupro-aluminium)

Bleibronze = CuPb (cupro-plomb)

Rotguss = CuSnZn(Pb) (L'exemple ci-dessus est un bronze en France, une "fonte rouge" en Allemagne)

DÉSIGNATION AFNOR DES ALLIAGES

1. Désignation des métaux et alliages.

1.1. Symboles chimiques internationaux, symboles AFNOR des métaux purs et des éléments d'alliage.

é/l	Symbole chimique	Symbole AFNOR	é/l	Symbole chimique	Symbole AFNOR
Aluminium	Al	A	Molybdène	Mo	D
Antimoine	Sb	R	Nickel	Ni	N
Azote	N	Az	Niobium	Nb	Nb
Béryllium	Be	Be	Phosphore	P	P
Bismuth	Bi	Bi	Plomb	Pb	Pb
Bore	B	B	Sélénium	Se	S
Cadmium	Cd	Cd	Silicium	Si	S
Chrome	Cr	C	Soufre	S	F
Chobalt	Co	K	Tantale	Ta	Ta
Cuivre	Cu	U	Titane	Ti	T
Étain	Sn	E	Tungstène	W	W
Fer	Fe	Fe	Vanadium	V	V
Magnésium	Mg	G	Zinc	Zn	Z
Manganèse	Mn	M	Zirconium	Zr	Zr

1.2. Désignation alphanumérique des métaux et des alliages.

ACIERS.
Aciers d'usage général non alliés (NF A 35-501)

A 48 M

moué

Rm = 48 daN/mm² minimum.

E 24

Re = 24 daN/mm² minimum

(1) : Rm et Re sont exprimés en N/mm² pour les nuances figurant dans les normes depuis 1972. Avant cette date, ils étaient exprimés en kgf/mm²; rigoureusement, par exemple pour E 24, 24 kgf/mm² soit : 235 N/mm².
Avec : 1kgf/mm² = 9,81 N/mm² et 1 MPa = 1 N/mm²

- Ces aciers A ou E ne sont pas prévus pour subir un traitement thermique.
- Les aciers du type E sont soudables selon leur qualité (en particulier les qualités 3 de toutes les nuances sont soudables).
- Les aciers du type A ne sont pas soudables sans précautions.

Aciers spéciaux non alliés pour traitements thermiques. NF A 02-005

CC 10

0,1% de C

Les lettres CC suivies d'un nombre égal à 100 fois la teneur centésimale en carbone.

XC 18 S

Soudable

Les lettres XC suivies :
- d'un nombre égal à 100 fois la teneur centésimale en carbone;
- éventuellement d'une lettre S (soudabilité);
- éventuellement de deux lettres définissant l'emploi.

XC 42 TS

0,42% de C

Pour trempe superficielle

Remarque :
Les nuances CC se différencient des nuances XC uniquement par des tolérances moins serrées sur les compositions et par des teneurs en S et P plus élevées.

Aciers faiblement alliés. NF A 02-005
Aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse.

0,35 % de carbone

35 NCD 6

Dans l'ordre :
- un nombre égal à 100 fois la teneur centésimale en carbone;
- les éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes;
- un ou deux nombres indiquant la teneur des éléments d'addition dans l'ordre décroissant
- éventuellement des lettres (M : moulé...)

Du nickel, du chrome, du molybdène

La teneur centésimale des éléments d'addition est multipliée par 4 pour (C, K, M, N, S), par 1000 pour le bore et par 10 pour tous les autres.

Aciers fortement alliés. NF A 02-005
Au moins un des éléments d'addition a une teneur supérieure à 5% en masse.

0,06 % de carbone

Z 6 CN 18-09

La lettre Z suivie dans l'ordre de :
- un nombre égal à 100 fois la teneur centésimale en carbone;
- les éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes;
- un ou deux nombres indiquant la teneur centésimale des éléments d'addition dans l'ordre décroissant

9 % de nickel
18 % de chrome
Du chrome et du nickel

Fig. 21

1.3. Désignation numérique des aluminium et alliages de transformation.

NF A 02-104.

L'objet de la présente norme est de définir les règles de désignation des produits corroyés ou destinés à être transformés par corroyage.

L'aluminium et les alliages sont désignés par un nombre de quatre chiffres.

Le premier chiffre :

Groupe	Aluminium ou alliage d'aluminium
1	Aluminium dont le titre est supérieur ou égal 99,00%
2	Aluminium et cuivre
3	Aluminium et manganèse
4	Aluminium et silicium
5	Aluminium et magnésium
6	Aluminium et magnésium et silicium
7	Aluminium et zinc
8	Aluminium et autres éléments.

Les chiffres 0 et 9 sont réservés à l'usage privé des producteurs.

Le deuxième chiffre et les deux derniers chiffres :

Aluminium non allié	Alliages d'aluminium
0 : si les impuretés ne font pas l'objet de contrôle individuel, 1 à 9 : si des limites spéciales sont prévues pour une ou plusieurs des impuretés	0 : alliage original 1 à 9 : correspondent aux modifications successives de l'alliage
Deux derniers chiffres	Indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99,00%

Exemples de désignation:

Aluminium teneur > 99%
 1080
 99,80 % d'aluminium
 Pas de contrôle des impuretés

Aliage d'aluminium et de cuivre
 2017
 Identification
 Alliage original

Equivalence alphanumérique : A 8
 Equivalence alphanumérique : A U4 G

Remarque :
 Cette désignation numérique n'est pas encore très utilisée, elle ne concerne pratiquement que les aluminiums et alliages corroyés. Elle devrait trouver un net développement dans l'utilisation de l'outil informatique en mécanique.

FONTES.

Deux lettres indiquant le type de fonte suivies :

- d'un premier nombre indiquant la résistance à la traction minimale en daN/mm² ;
- éventuellement d'un deuxième indiquant l'allongement A en (%).

Type de fonte	Symbole
Fonte grise	Ft
Fonte malléable perlitique	MP
Fonte malléable ferritique à cœur noir	MN
Fonte malléable à cœur blanc	MB
Fonte à graphite sphéroïdal	FGS

* sauf FGS en N/mm²

Rm = 20 daN/mm² minimum

Fonte GS

FGS 500-7 A5-7 mini

Rm = 500 N/mm² minimum

NON FERREUX.

Cuivre et alliages de cuivre - Nickel et alliages de Nickel. NF A 02-009

Cuivre

Cu 99
 99,99 % de pureté

Alliage de cuivre

Cu Zn15 A 3
 Zinc 15%
 Aluminium 3%

Métaux et alliages non ferreux autres que Cu et Ni : aluminium, zinc, ...
 NF A 02-004.

Métal pur :
 Le symbole AFNOR suivi d'un indice de pureté.

Aliage :
 Le symbole AFNOR du métal de base suivi
 - d'un symbole d'élément d'addition ;
 - d'un nombre indiquant directement sa teneur centésimale ;
 - d'un symbole de l'élément d'addition suivant dans l'ordre décroissant des teneurs ...

Aluminium

A 8
 99,8% de pureté

Alliage d'aluminium

A S10 G
 du magnésium (< à 4%)
 10% de silicium

Fig. 22

1.4. Désignation du mode d'obtention et de l'état de livraison des métaux et alliages non ferreux moulés, NF A 02-002.

Mode d'obtention

Y0	Non défini
Y1	Lingot
Y2	Sable
Y3	Coquille par gravité
Y4	Sous pression
Y5	Par concrétation
Y6	-
Y7	Coulée continue
Y8	Centrifugation
Y9	Suivant prescriptions

Pièces moulées

Traitement thermique

0	Aucun traitement ou non spécifié
1	Recuit
2	Tempé
3	Tempé et revenu
4	Tempé et mûri
5	Stabilisé
6	Tempé et stabilisé
7	-
8	-
9	Suivant prescriptions

Exemple de désignation : A S13 13 % de silicium Moulé Tempé et revenu

Le tableau 1 nous donne :

1.5. Désignation conventionnelle des états métallurgiques des métaux et alliages non ferreux corroyés, NF A 02-006 ; 02-007 ; 02-008.

Les caractéristiques mécaniques d'un produit corroyé dépendent des traitements mécaniques ou thermiques qu'il a subi. L'état métallurgique facilite son identification.

Principe de désignation :

- l'état métallurgique de base par une lettre F, O, H, ou T. (voir tableau 2)
- le moyen principal d'obtenir cet état par un ou plusieurs chiffres à la suite de la lettre;
- des variantes conventionnelles ou particulières par un ou plusieurs chiffres à la fin.

Etat métallurgique de base :

Symbole	Définitions
F	Etat brut de fabrication ; Etat d'un produit obtenu par déformation plastique sans que ses caractéristiques mécaniques soient définies.
O	Etat recuit ; Etat d'un produit corroyé ayant subi un traitement thermique lui conférant la résistance spécifiée la plus faible sans altération du produit.
H	Etat écroui éventuellement restauré ou stabilisé ; Etat d'un produit écroui par déformation plastique et éventuellement stabilisé ou restauré par un chauffage à température modérée.
T	Etat durci par traitement thermique ; Les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie de l'ensemble des traitements suivants : mise en solution - trempe - maturation - revenu.

- Les états F et O ne comportent pas de subdivisions sauf pour O (S grossier du grain).
- Les états H et T comportent des subdivisions définies par les tableaux suivants en fonction des métaux et alliages.

Subdivisions des états de base :

- Cuivre et alliages de cuivre - Nickel et alliages de nickel, NF A 02-008.

Tableau 3.

Symbole	Ire sub.	Définitions
H	1	Ecrouissage seul
	2	Ecrouissage suivi d'un traitement thermique de recuit partiel
	3	Ecrouissage suivi d'un traitement de détente
T	A	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée
	B	Mise en solution et trempe
	C	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée et déformation à froid
	D	Mise en solution, trempe et déformation à froid
	E	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée et revenu
	F	Mise en solution, trempe et revenu
	G	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée déformation à froid et revenu
	H	Mise en solution, trempe, déformation à froid et revenu
	K	Refroidissement contrôlé après fabrication à température élevée revenu et déformation à froid
	L	Mise en solution, trempe, revenu et déformation à froid

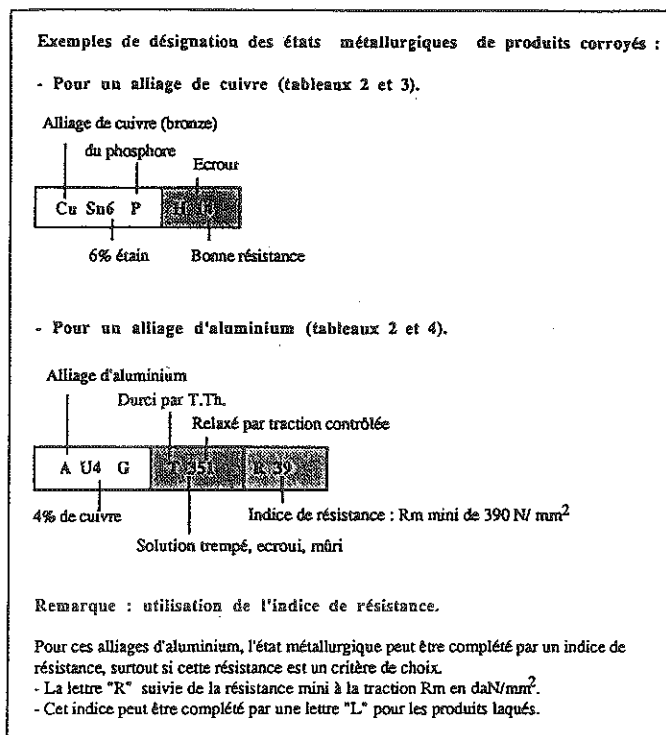
Le symbole H est souvent suivi d'un deuxième chiffre qui indique le degré d'écrouissage. Cette désignation est choisie dans l'ordre numérique et pour l'ordre croissant des valeurs de la résistance mécanique du métal (1 - 2 - 3 - 4 - 5)

- Aluminium et alliages d'aluminium, NF A 02-006.

Tableau 4.

Symbole	Ire sub.	Définitions	2e sub.	Définitions
H	1	Ecrouissage	2	Nuance 1/4 dure
	2	Ecrouissage puis restauration	4	Nuance 1/2 dure
	3	Ecrouissage puis stabilisation	6	Nuance 3/4 dure
T	1	Refroidi et mûri	8	Nuance dure
	2	Refroidi, écroui et mûri	9	Nuance extra-dure
	3	Solution, trempé, écroui, mûri	1	Revenu doux
	4	Solution, trempé, mûri	6	Revenu dur
	5	Refroidi et revenu	51	Relaxation par traction contrôlée
	6	Solution, trempé et revenu	52	Relaxation par compression
	7	Solution, trempé et sur-revenu	54	Relaxation par traction - compression
8	Solution, trempé, écroui et revenu			
9	Solution, trempé, revenu et écroui			
10	Refroidi, écroui et revenu			

Fig. 23



Comparaison DIN - AFNOR

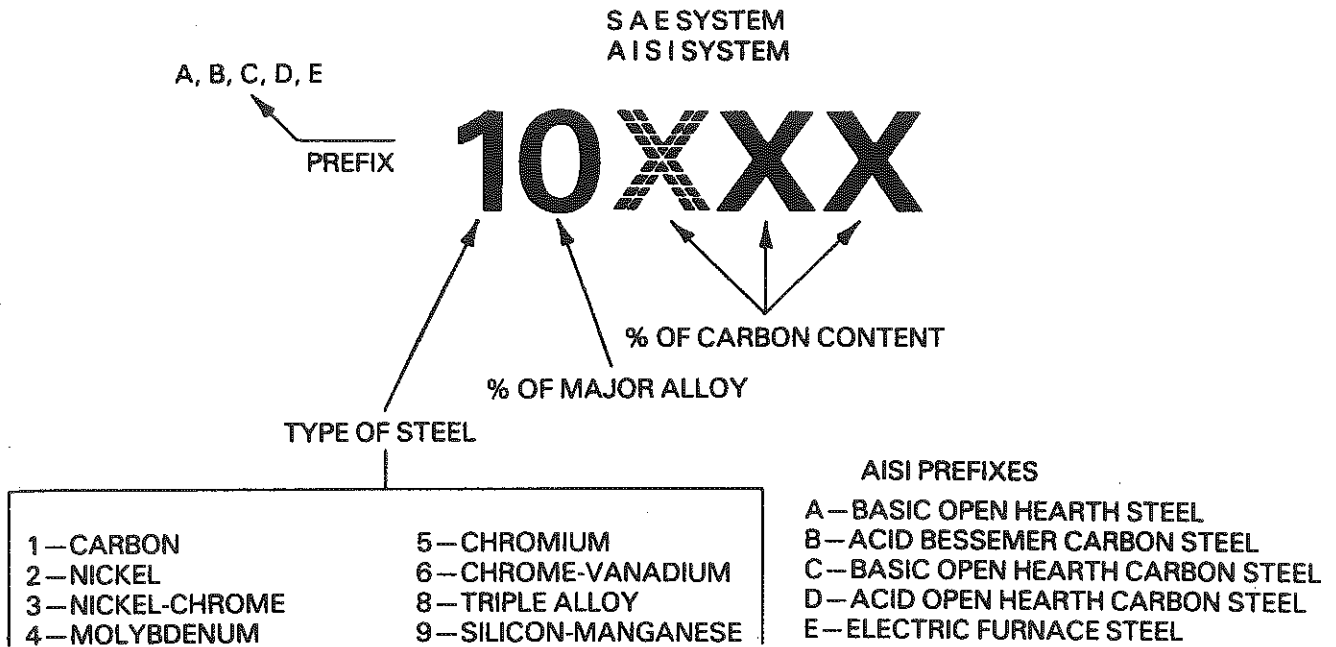
DIN	St	C	Ck	X	GG-20	GS-40	GTS	GTW	AlCuMg1
AFNOR	A	CC	XC	Z	Ft-20	A40M	MB	MB	Al-Cu4Mg1

Pour les teneurs en éléments d'addition des faiblement alliés, les conventions sont identiques, sauf;

DIN	W	Ce, P, S, N	100
AFNOR	W		10

Fig. 24

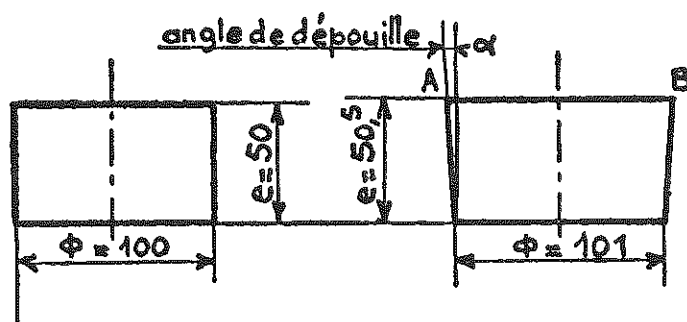
DESIGNATION S.A.E/A.I.S.I. DES ACIERS



SAE Classification of Steels	
CARBON STEELS	1xxx
Plain carbon	10xx
Free-cutting (resulfurized screw stock)	11xx
Free-cutting, manganese	X13xx
HIGH-MANGANESE	T13xx
NICKEL STEELS	2xxx
0.50% nickel	20xx
1.50% nickel	21xx
3.50% nickel	23xx
5.00% nickel	25xx
NICKEL-CHROMIUM STEELS	3xxx
1.25% nickel, 0.60% chromium	31xx
1.75% nickel, 1.00% chromium	32xx
3.50% nickel, 1.50% chromium	33xx
3.00% nickel, 0.80% chromium	34xx
Corrosion- and heat-resisting steels	30xxx
MOLYBDENUM STEELS	4xxx
Chromium-molybdenum	41xx
Chromium-nickel-molybdenum	43xx
Nickel-molybdenum	46xx and 48xx
CHROMIUM STEELS	5xxx
Low-chromium	51xx
Medium-chromium	52xxx
CHROMIUM-VANADIUM STEELS	6xxx
TRIPLE-ALLOY STEELS (NICKEL, CHROMIUM, MOLYBDENUM)	8xxx
MANGANESE-SILICON STEELS	9xxx

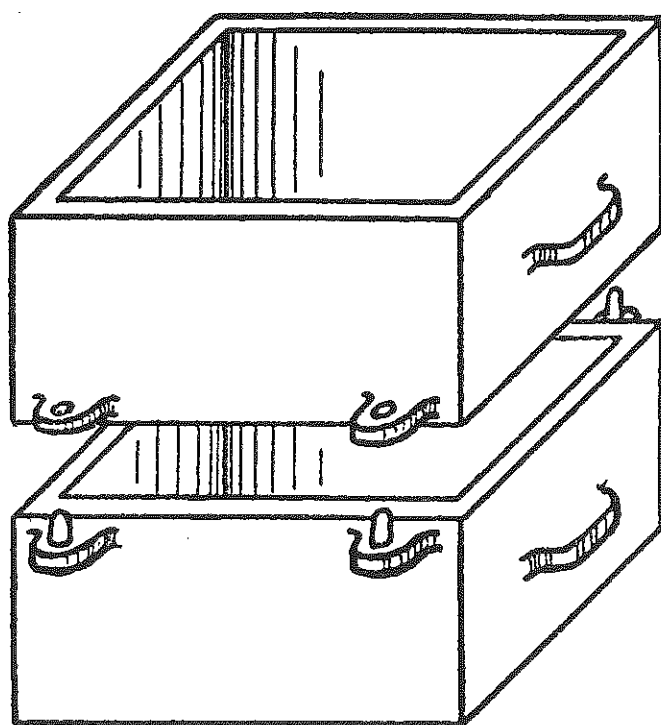
Fig. 25

3. FONDERIE



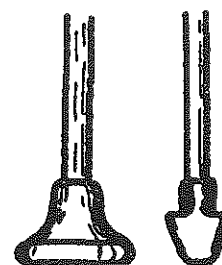
— Pièce et modèle correspondant.

Fig. 26



— Châssis de fonderie.

Fig. 27



— Pilette et fouloir.

Fig. 28

Fonderie

1. La fonderie consiste à apporter le métal sous forme liquide dans un *moule*. Les problèmes qui se posent sont :

- 1) La *réalisation du moule*.
- 2) Le métal doit épouser la forme du moule. Ceci dépend de sa *viscosité* et de sa *tension superficielle*.
- 3) Le métal contient des *gaz dissous* qui se dégagent lors de la solidification. Il faut les évacuer.
- 4) Le *moule* doit
 - être *réfractaire*
 - avoir assez de *cohésion*
 - être *compressible*

La compressibilité est nécessaire du fait du *retrait*, spécialement pour les noyaux.

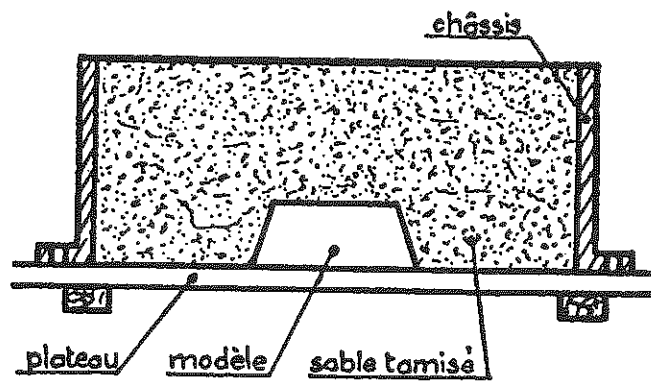
- 5) Il faut prévoir la *contraction* du métal (masselottes).
- 6) Il faut pouvoir *démouler*.

2. La technique la plus courante consiste à faire un moule de sable à l'aide d'un *modèle*. Ce modèle diffère quelque peu de la pièce

- il est plus grand, pour compenser le retrait à l'*état solide*. A cette fin, le modéliste utilise un mètre trop long d'1 %.
- il est en *dépouille*, pour faciliter son *démoulage*.

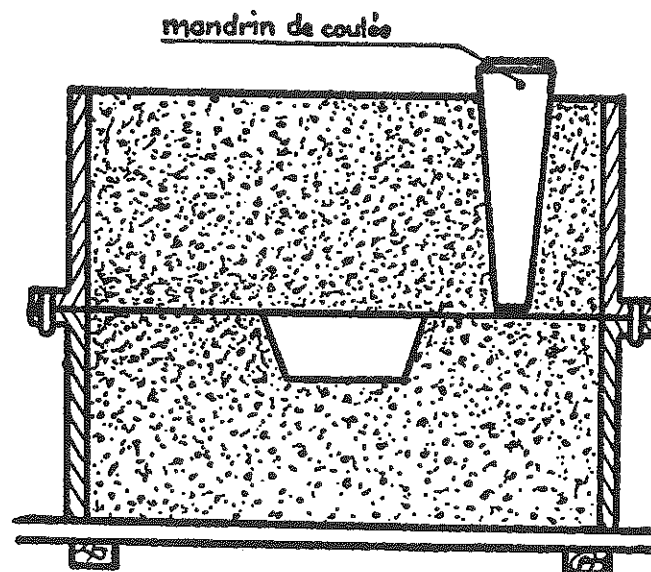
Par ailleurs, il doit être *bien poli*. En particulier, il ne peut y subsister de traces d'outil perpendiculaires à la direction de décochage. Le modèle peut être en *bois* ou en *polystyrène* recouvert de papier gras.

3. Les accessoires nécessaires à la fabrication du moule sont des châssis de fonderie, et des outils à tasser le sable, pilette et fouloir.



— Exécution du dessous de châssis.

Fig. 29



— Exécution du dessus de châssis.

Fig. 30

4. Examinons les différentes étapes de la fabrication d'un moule simple.

- 4.1. On commence par placer le modèle sur un plateau, de telle façon que les dimensions les plus grandes soient sur celui-ci. On pose alors un châssis, oreilles en bas, sur le même plateau, puis on remplit de sable. On obtient ainsi le *dessous* du moule.
- 4.2. Ayant retourné le dessous, on le surmonte du demi-châssis supérieur, et on le remplit de sable en ayant soin de placer un *mandrin de coulée*.
- 4.3. On rouvre l'ébauche du moule, on retire le mandrin de coulée, on lisse le sommet du trou de coulée.
- 4.4. On ménage alors un canal de coulée dans le dessous, puis on retire doucement le modèle.
- 4.5. On referme alors le moule. Des trous d'air sont pratiqués dans le dessus, jusqu'à proximité de l'empreinte, pour faciliter l'évacuation des gaz. C'est l'opération de *tirage d'air*. Le moule doit alors être chargé pour éviter le soulèvement du dessus sous l'effet de la pression hydrostatique de la fonte.
- 4.6. On peut alors couler la fonte dans le moule.

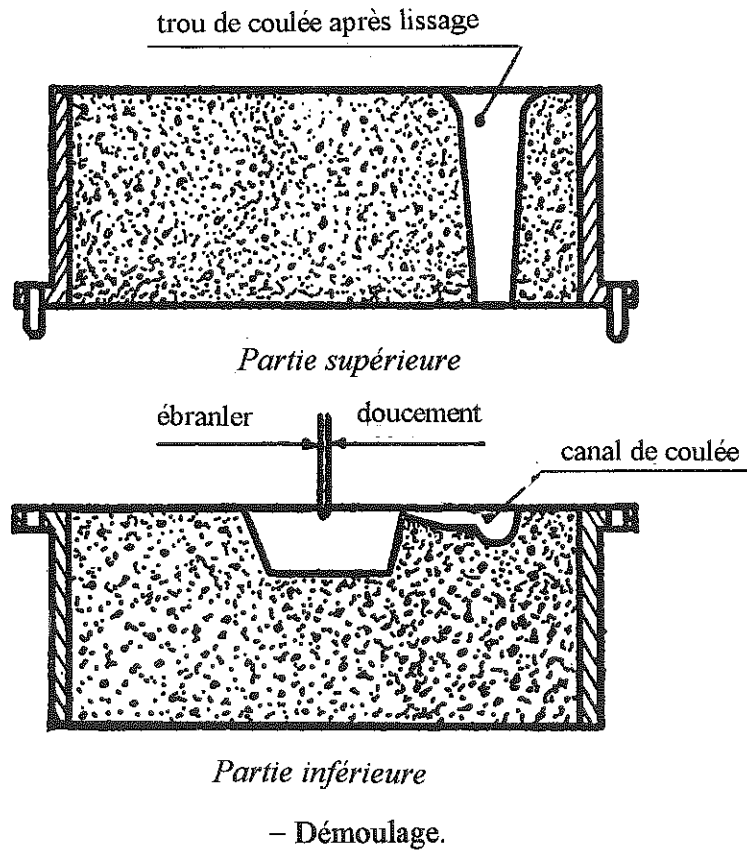


Fig. 31

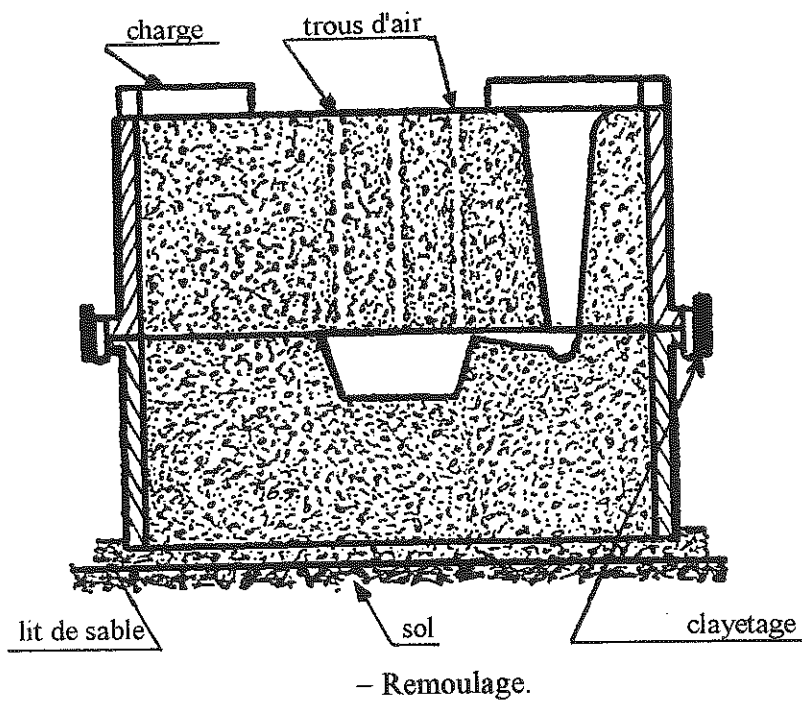


Fig. 32

5. Qualités des sables

Les sables doivent être

- a) *plastiques*, c'est-à-dire capables d'épouser au mieux les formes du modèle
- b) *cohérents*, c'est-à-dire avoir une résistance à la traction suffisante pour garder cette forme (un sable non cohérent coule)
- c) *réfractaires*, c'est-à-dire capable de supporter les températures élevées ($\approx 1500^{\circ}\text{C}$)
- d) *perméables*, de manière à laisser passer les gaz

Les sables sont formés de *silice* et d'*argile*. La *silice* est responsable de la *réfractarité* et de la *perméabilité*. L'*argile* donnera la *plasticité* et la cohésion.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Réfractarité} \\ \text{Perméabilité} \end{array} \right\} \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} + \text{ de silice} \\ \text{grains + gras et + sphériques} \\ - \text{ d'argile, bien répartie entre les grains} \end{array} \right.$$

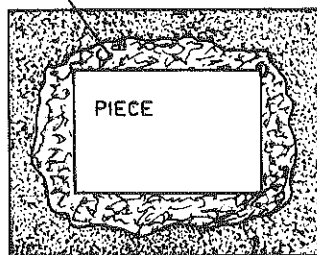
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Plasticité} \\ \text{Cohésion} \end{array} \right\} \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{grains + fins} \\ + \text{ d'argile} \end{array} \right.$$

Il y a donc un compromis à trouver.

6. Origine du sable

On distingue le *sable neuf*, provenant des carrières et le *sable vieux*, obtenu par régénération. On appelle *sable de contact* le sable que l'on apporte près du modèle. Il doit être d'excellente qualité, car c'est de sa tenue que dépend la forme de la pièce. Ce sera donc de préférence du sable neuf. Cependant, pour des raisons de pollution, on tend à utiliser de plus en plus de sable vieux, ce qui limite les déchets.

6. SABLE DE CONTACT (TRES BON)



SABLE DE REMPLISSAGE

Fig. 33

Le sable peut être utilisé *vert* ou *étuvé*. Les *noyaux* sont généralement étuvés.

7. Evacuation des gaz

Les gaz proviennent de :

- la dilatation de l'air contenu dans le moule
- l'air dissous dans la fonte
- la décomposition de l'eau et de certains composants du sable

Pour leur évacuation, il faut que le sable soit *poreux*. Mais cela ne suffit pas. Il faut encore faciliter le passage des gaz à l'aide de *trous d'air*. Ces trous sont pratiqués à l'aide d'aiguilles de 3 - 4 mm de diamètre, dites *aiguilles à air*. C'est l'opération de *tirage d'air*. En somme, on peut comparer les pores à des vaisseaux capillaires et les trous d'air à des veines.

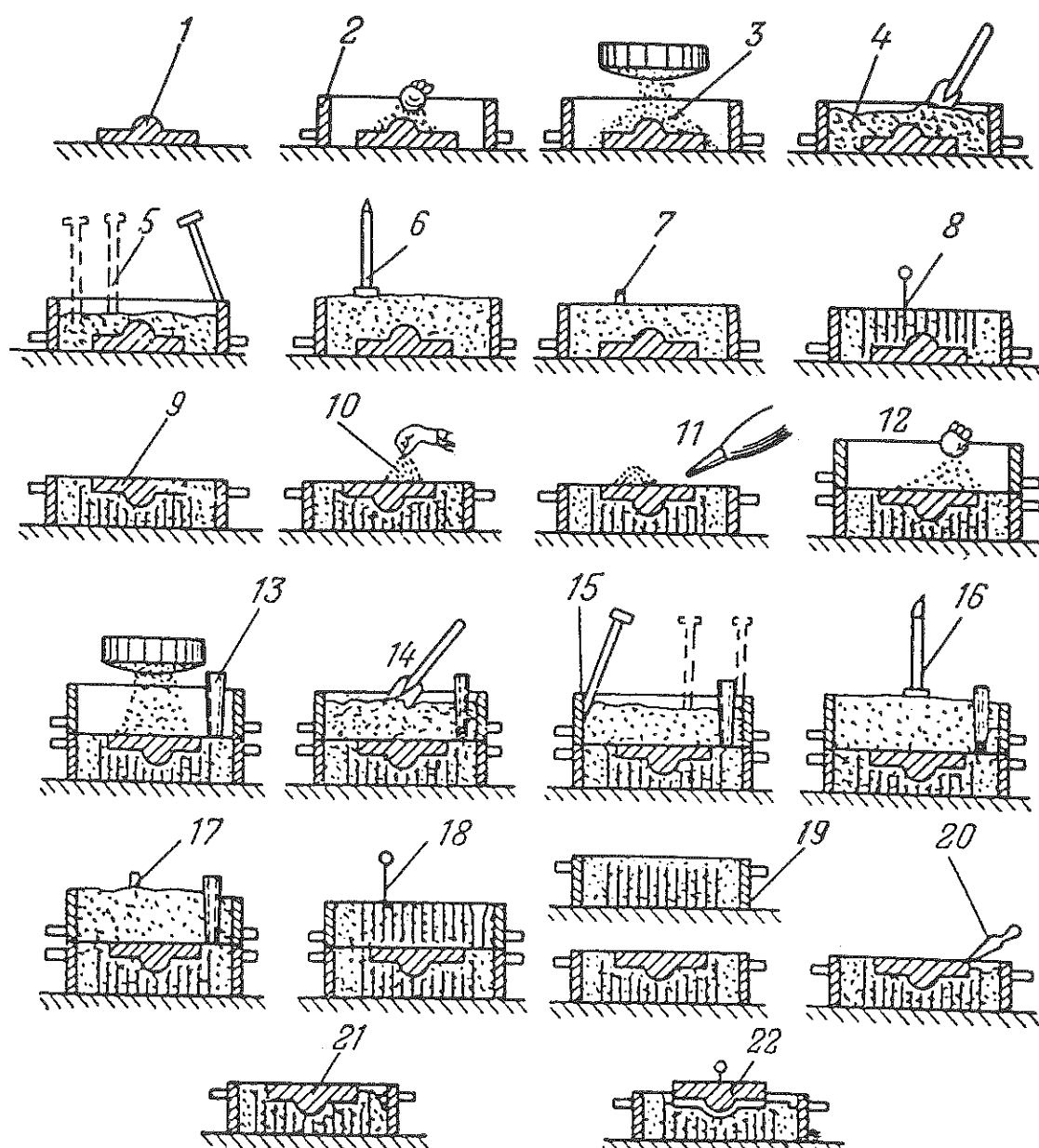


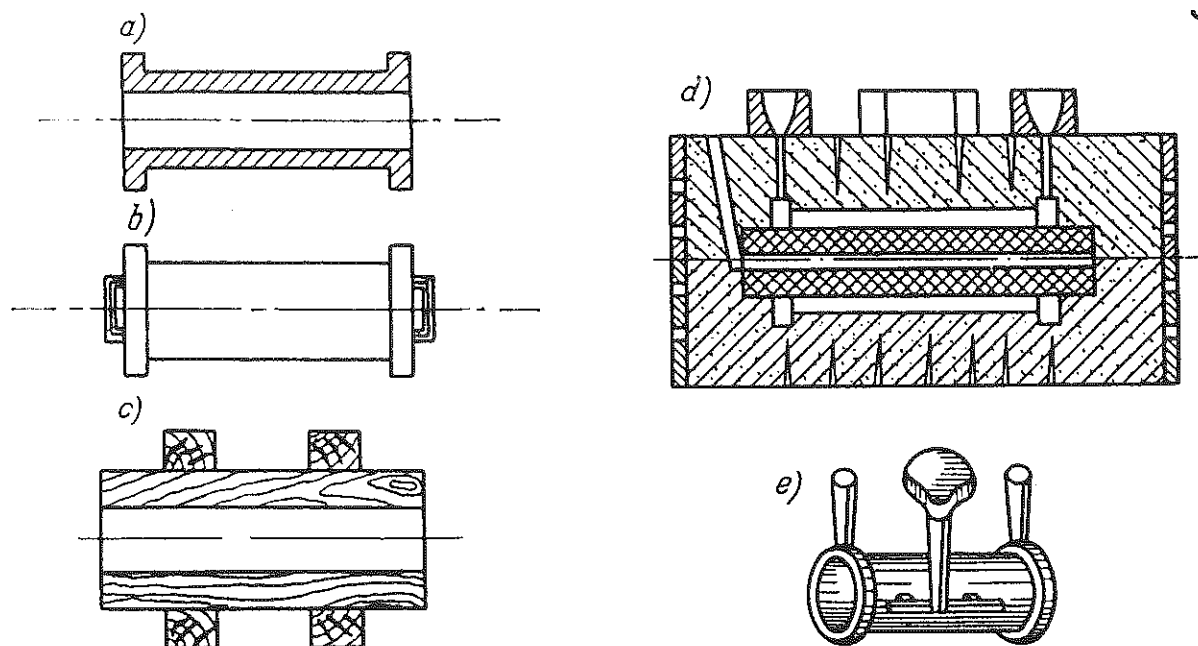
Fig. 34

8. Détail des opérations

1. Poser le modèle sur la planche à modèles
2. Saupoudrer avec de la *poudre de lycopode*, du *talc* ou du *graphite* (noir minéral).

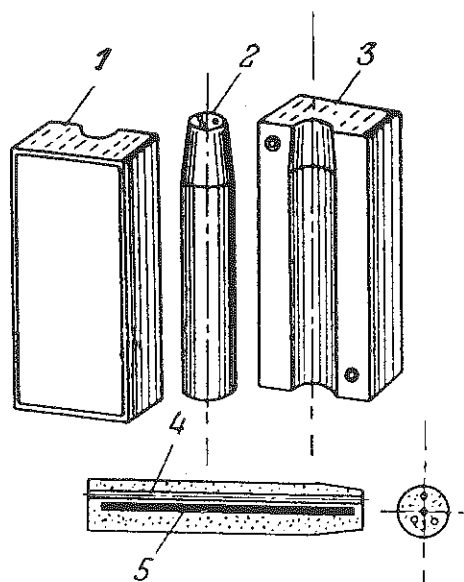
Cette opération est destinée à donner une *peau lisse* aux pièces en fonte. La poudre provoque en effet la formation de *carbone luisant*. Mais ces poudres sont très polluantes (*peste des fonderies*). On tend donc à les remplacer par des *huiles carboniques* ou du *polystyrène*, qui forment également du carbone luisant.

3. Sable de contact (bon, neuf) : 15 à 20 mm
4. Sable de remplissage (vieux) : 70 à 100 mm
5. Fouloir
6. Battre
7. Enlever l'excédent de sable avec une règle
8. Tirage d'air
9. Retourner
10. Saupoudrer avec du sable blanc
11. Enlever l'excédent de sable blanc
12. Placer le dessus, saupoudrer
13. Placer le mandrin de coulée et le sable de contact
14. Sable de remplissage
15. Fouler
16. Battre
17. Lisser à la règle
18. Tirage d'air, élargir le trou de coulée
19. Retirer le dessus
20. Percer le canal de coulée
21. Humidifier le bord du moule à proximité du modèle
22. Retirer le modèle.



Moulage d'un tube en fonte
a — pièce finie; *b* — modèle en bois; *c* — boîte à noyaux en bois; *d* — moule de sable en châssis; *e* — pièce avec les coulées et les masselottes

Fig. 35



Boîte à noyau et répartition des trous d'air au sein du noyau

1, 3 — parties de la boîte; 2 — noyau; 4 — trous d'air; 5 — armature (fil de fer de 2 mm de diamètre)

Fig. 36

9. Noyaux

Dans le cas d'une pièce creuse, il faut utiliser un *noyau*. Les noyaux doivent être très résistants, très plastiques et très perméables.

- Pour assurer leur résistance, on les *arme*.
- On fait des *trous d'air* dans les noyaux
 - à l'aide d'une aiguille
 - si c'est impossible, à l'aide d'une *bougie filée* ou *rat de cave* : il s'agit de stéarine avec une mèche en coton, que l'on insère dans le sable. Lors de l'étuvage, la stéarine fond et on peut retirer la mèche.
Dans le cas de noyaux très volumineux, on remplit la partie centrale de *coke*, qui est poreux et résistant.
- Lorsque les noyaux sont très grands, il faut leur donner des supports pour qu'ils résistent à la poussée d'Archimède.

Les supports sont en acier *étamé*.
Lors de la coulée, l'étain fond et met à nu une surface bien propre qui se soude à la fonte

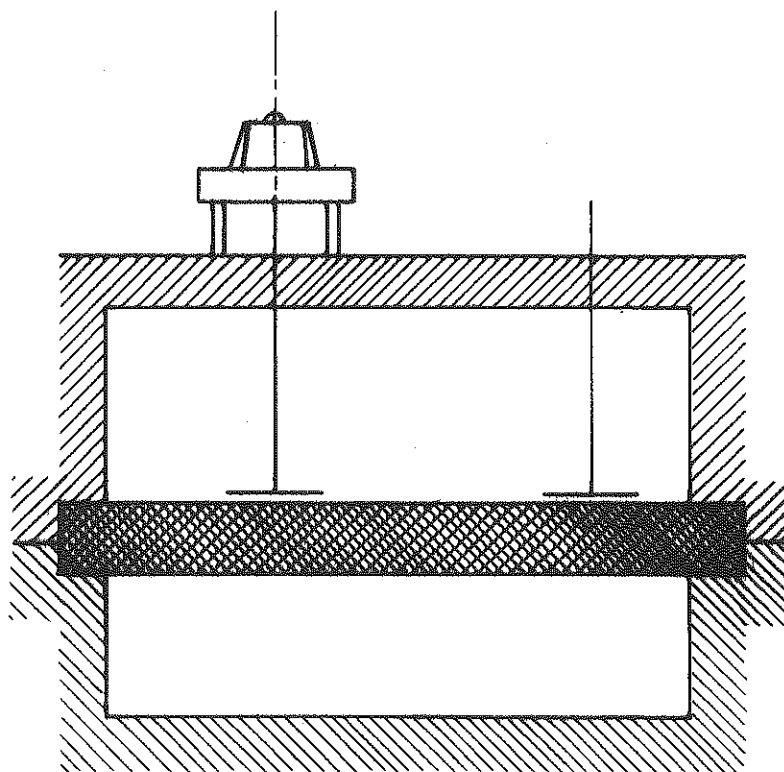
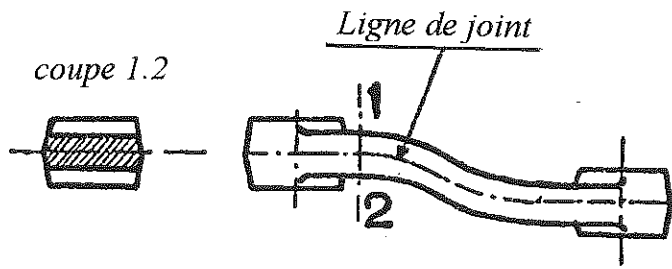
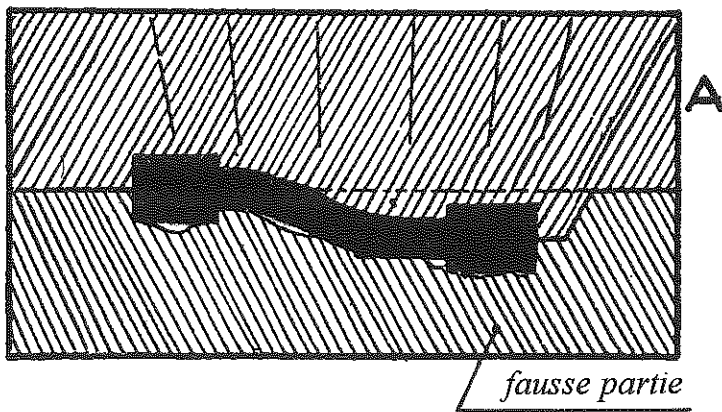


Fig. 37



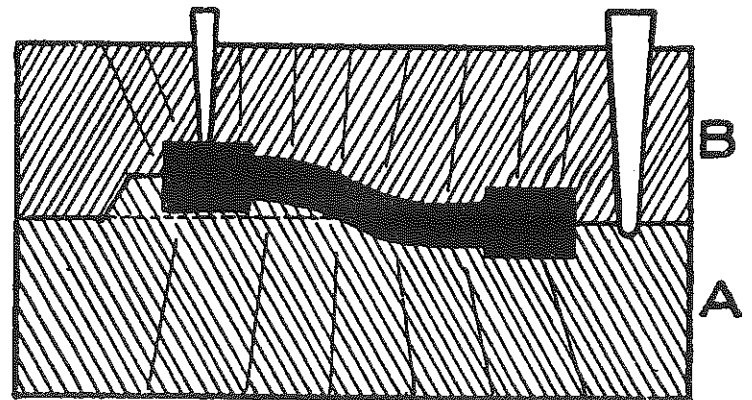
- Dessin de la pièce à mouler.

Fig. 38



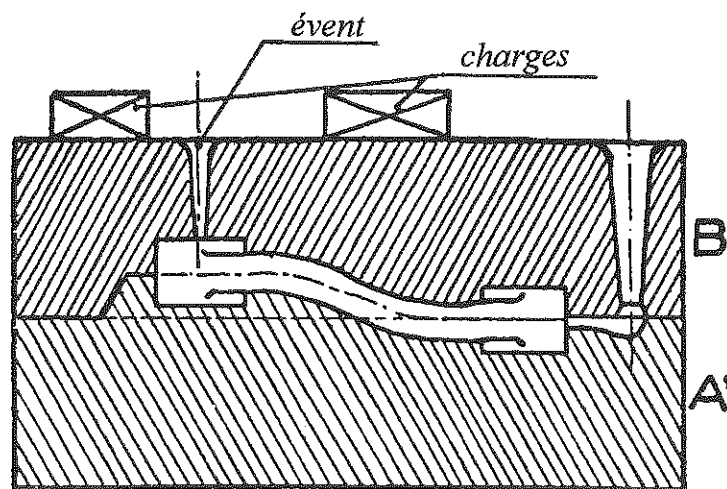
- Exécution du châssis de dessous A.

Fig. 39



- Exécution du châssis de dessus B.

Fig. 40



- Finition du moule et remoulage

Fig. 41

10. Fausse partie

Il n'est pas possible de placer correctement une pièce gauche sur la planche. Dans ce cas, on utilise une *fausse partie*, sorte de faux moule sur lequel on place le modèle dans la position voulue.

Si l'on fait plusieurs pièces identiques, la fausse partie peut être réutilisée. On l'appelle alors *couche*.

On remarquera que le joint du moule est *gauche*. Lorsque la surface du joint est très tourmentée, il faut *armer le sable* à l'aide de *barres de châssis*.

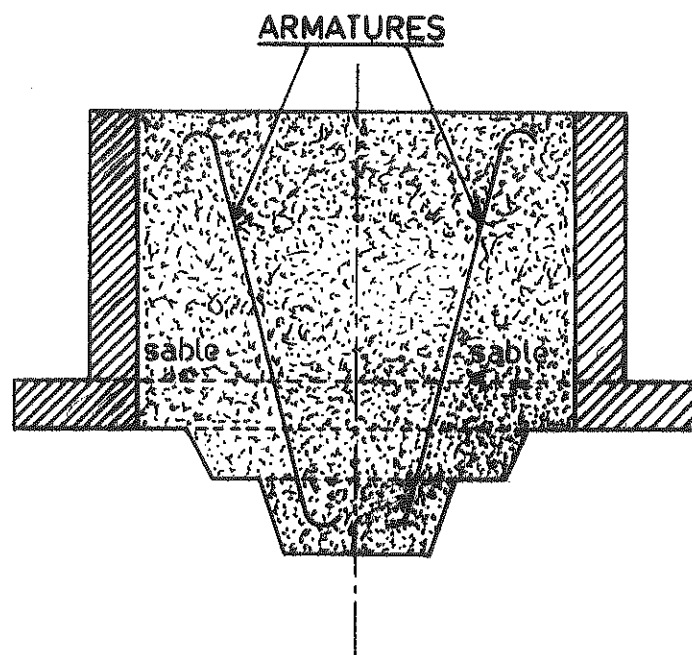
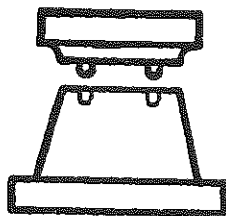
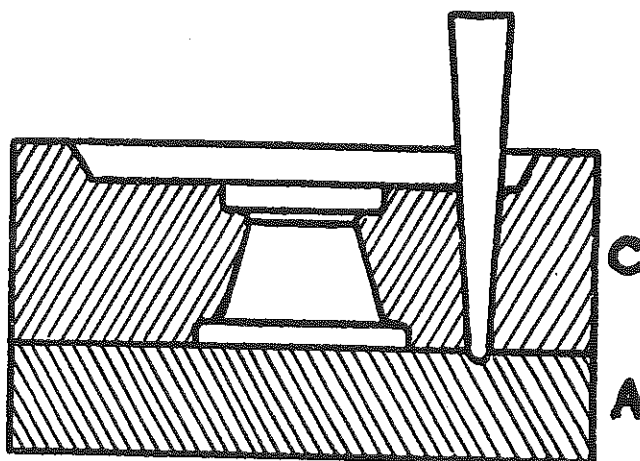


Fig. 42



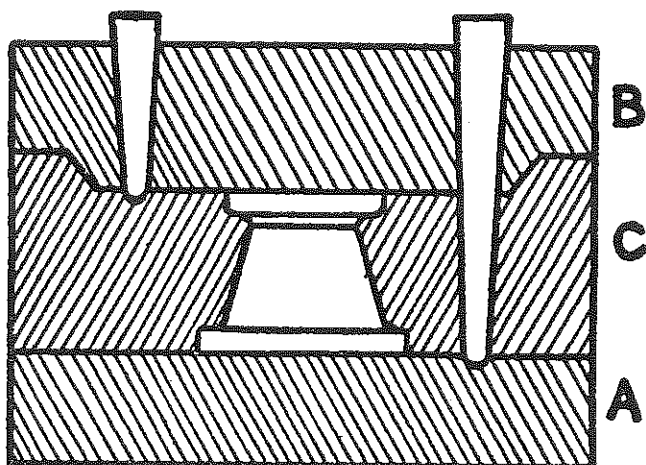
— Modèle.

Fig. 43



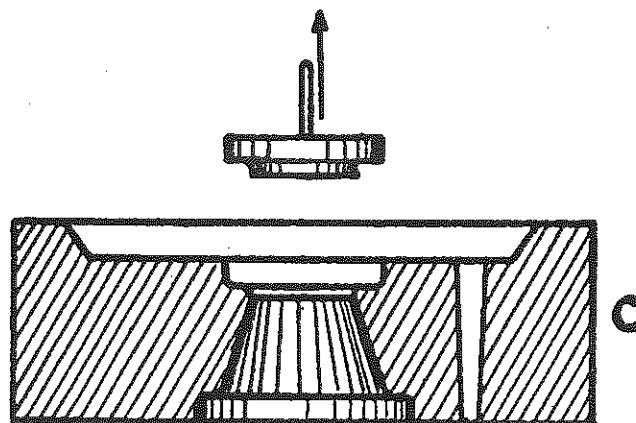
— Exécution de la chape C.

Fig. 44



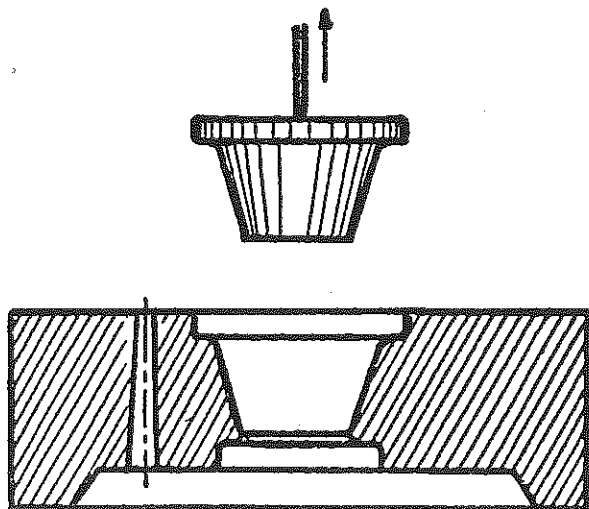
— Exécution du châssis de dessus B.

Fig. 45



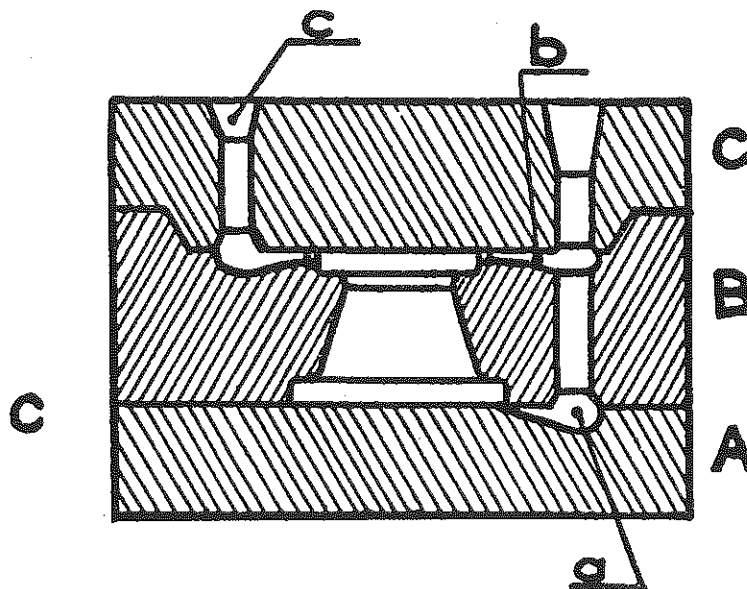
— Enlèvement de la partie supérieure du modèle.

Fig. 46



— Enlèvement de la partie inférieure du modèle.

Fig. 47



— Finition du moule et remoulage.

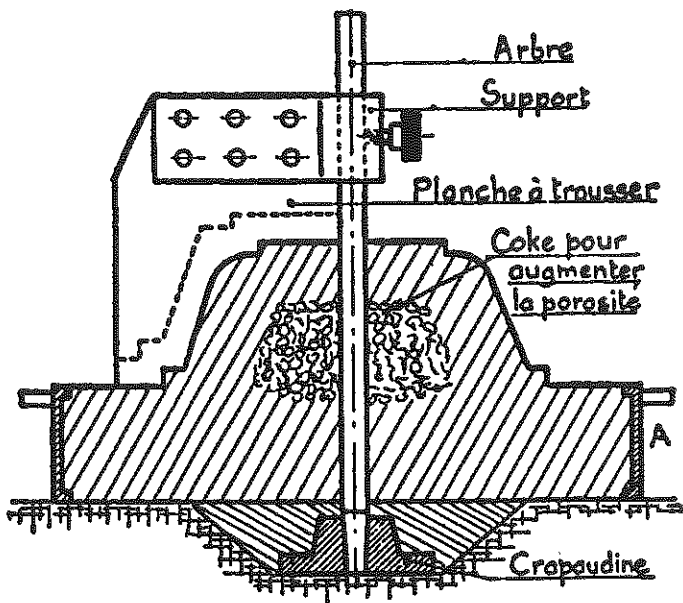
Fig. 48

11. Moulage en chape

Dans le cas de modèles présentant une contre-dépouille, il n'est pas possible d'utiliser la méthode ci-dessus. On peut cependant réaliser un modèle en deux parties. Le moule comportera alors trois parties. Celle du centre s'appelle *chape*.

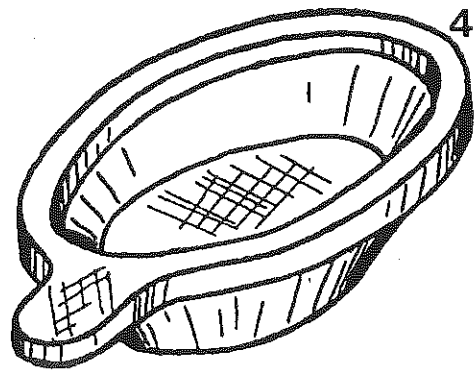
L'inconvénient essentiel de ce procédé est le prix de revient élevé du modèle en deux parties. En effet, il ne suffit pas de scier le modèle en deux, car la scie enlève une épaisseur égale à sa voie.

On notera, sur cette figure, l'existence de deux canaux de coulée a et b. Au début de la coulée, la fonte arrive essentiellement par en bas. Il en résulte que la fonte située le plus haut, première arrivée, est la plus froide. Lorsque les pertes de charge des deux canaux s'équilibrent, de la fonte fraîche arrive par dessus, ce qui égalise les températures.



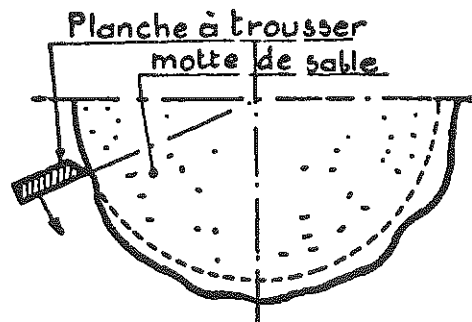
— Troussage du châssis de dessous au profil extérieur.

Fig. 49



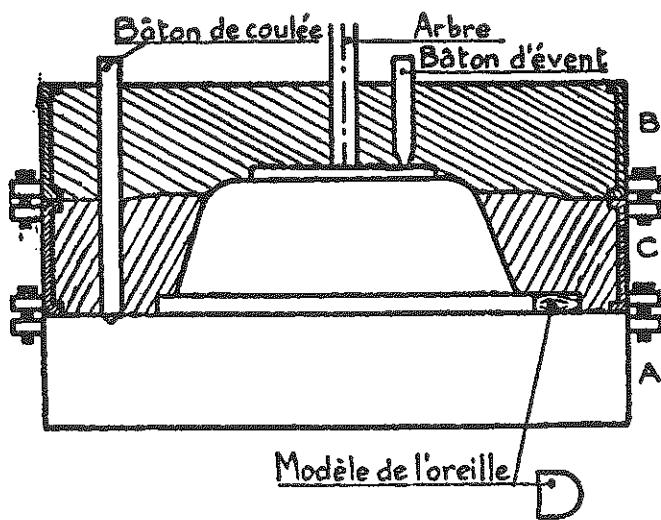
— Dessin de la pièce à exécuter.

Fig. 50



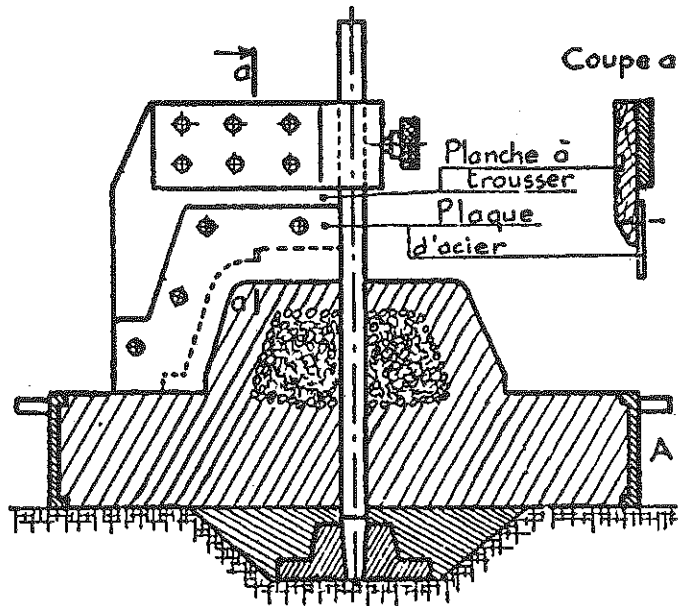
— Action de la planche à trousser.

Fig. 51



— Exécution du châssis de dessus.

Fig. 52



— Troussage du châssis de dessous au profil intérieur.

Fig. 53

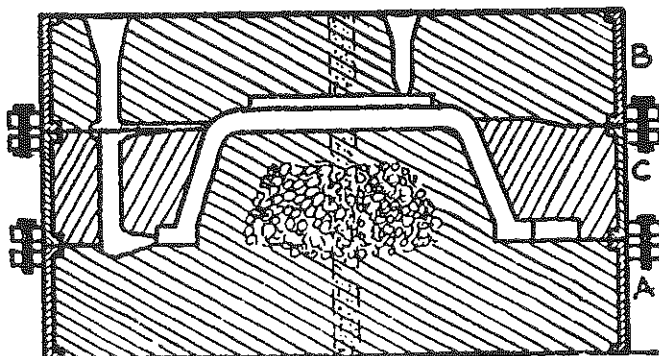


Fig. 54 — Finition du moule et remoulage.

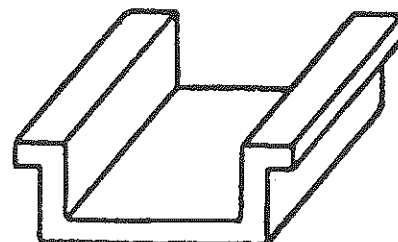


Fig. 55 — Pièce à exécuter.

12. Moulage au trousseau

Pour la fabrication de grandes pièces circulaires, on serait conduit à des modèles chers, encombrants et lourds. Il existe une autre technique, dite du moulage au trousseau, qui permet de se passer de modèle. Soit à réaliser la cuve ci-contre. On commence par trousser le dessous au *diamètre extérieur*, à l'aide d'une planche tournant autour d'un axe. La planche est tenue à l'axe par un *porte-planche*, encore appelé *trusquin* ou *drapeau*. La crapaudine se monte comme suit :

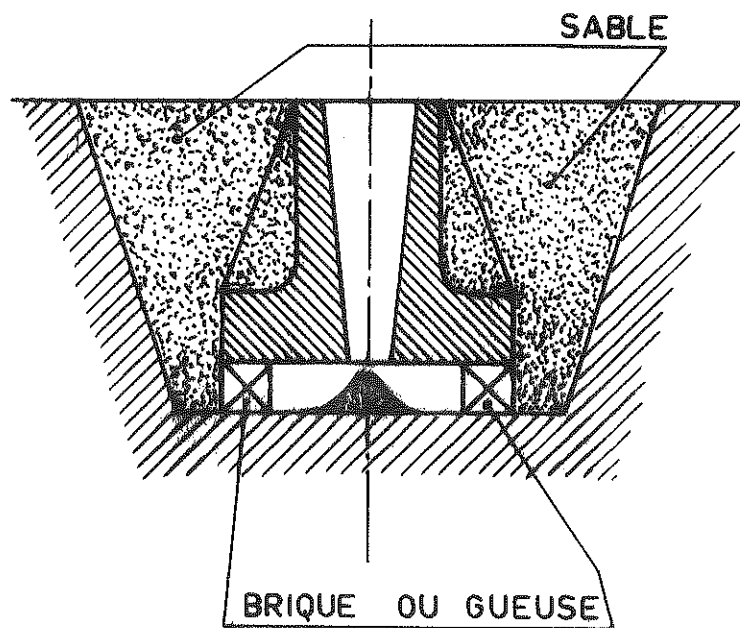
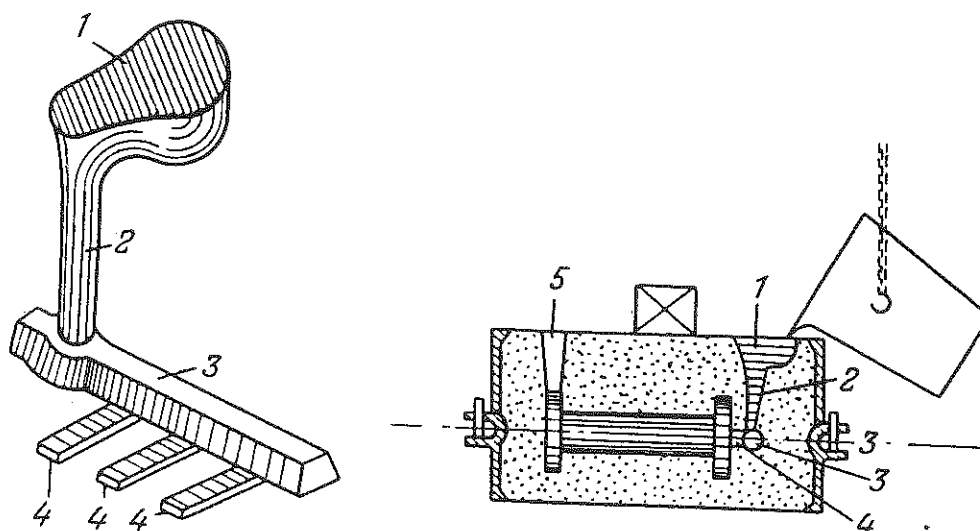


Fig. 56

Le trusquin peut être - serré sur l'arbre, qui tournera dans la crapaudine
- monté fou sur l'arbre, qui devra alors avoir une bague.

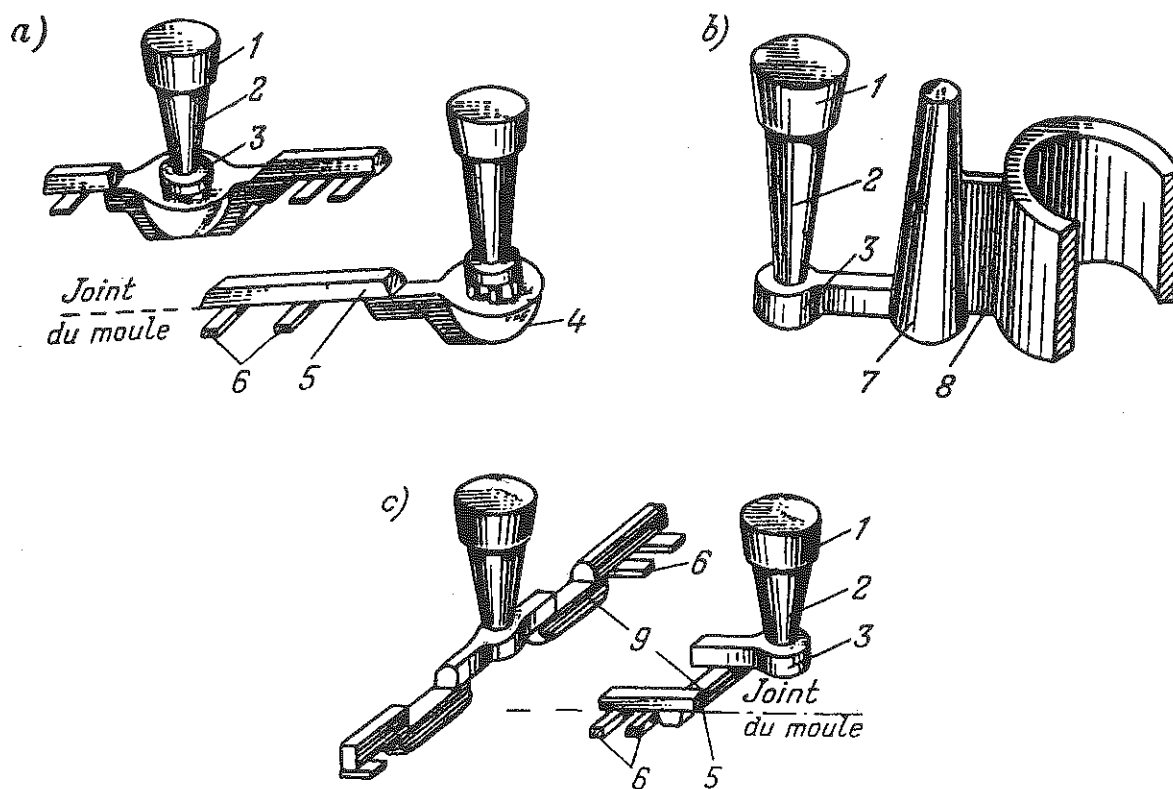
Le dessous ainsi réalisé servira de modèle au-dessus. Après avoir réalisé ce dernier, on reprendra le troussage de dessous à son diamètre définitif.

Ce procédé convient particulièrement pour la *fabrication unitaire*. S'il s'agit d'une *série*, un modèle se justifiera dès que l'économie de main d'oeuvre qu'il permettra compensera le coût de sa réalisation.



Jets de coulée ordinaires pour la fonte

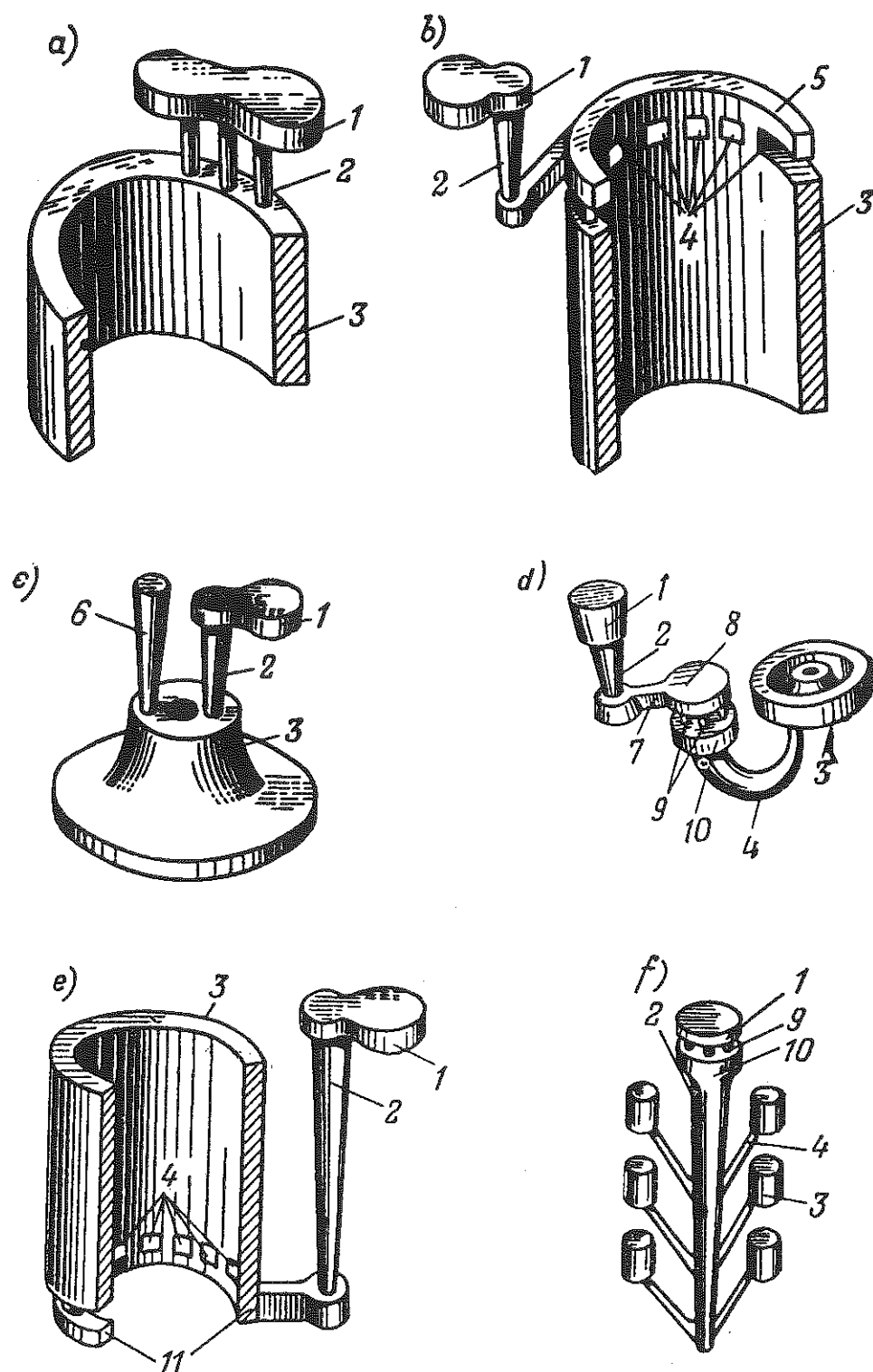
Fig. 57



Coulées horizontales

a — à chenal filtrant; b — à attaque verticale; c — à freinage; 1 — bassin de coulée; 2 — jet principal; 3 — receveur; 4 — receveur sous tamis; 5 — chenal; 6 — attaques; 7 — mas-selottes de l'attaque; 8 — attaque verticale; 9 — canaux de coulée

Fig. 58



Coulées verticales

a — en plute; *b* — en plute avec chenal; *c* — simplifiée pour coulée en chute;
d — par corne avec chenal filtrant; *e* — en nourrice à chenal annulaire;
f — en nourrice pour petites pièces; 1 — bassin; 2 — jet principal; 3 — pièce;
 4 — alimenteurs verticaux ou à corne; 5 — collecteur annulaire; 6 — évent;
 7 — canal de coulée; 8 — chenal filtrant; 9 — alimenteurs en tamis;
 10 — receveur sous tamis; 11 — chenal annulaire

Fig. 59

13. La coulée

13.1. Principe

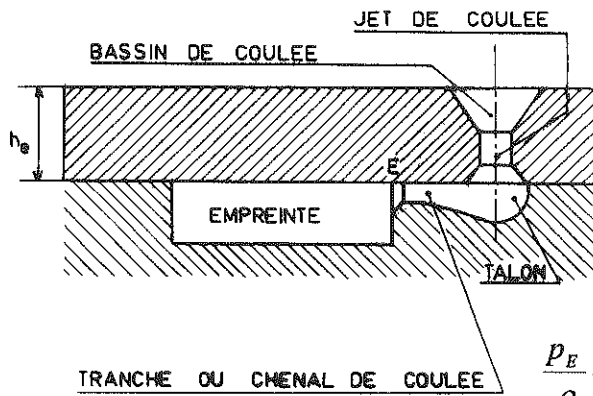


Fig. 60

$$\frac{p_E}{\rho} + \frac{v_E^2}{2} = gh_E - e_f$$

↓
perte de charge

Il faut que la charge à l'empreinte soit faible $\Rightarrow e_f$ grand \Rightarrow jet de coulée mince

$(e_f = \frac{\lambda l v^2}{D 2})$ [sinon abîme l'empreinte]

13.2. Bassin de coulée

bon : si des scories contenues dans la poche se trouvent dans le jet, elles surnagent.

mauvais : tourbillon \rightarrow entraîne de l'air.

2. BASSIN DE COULEE

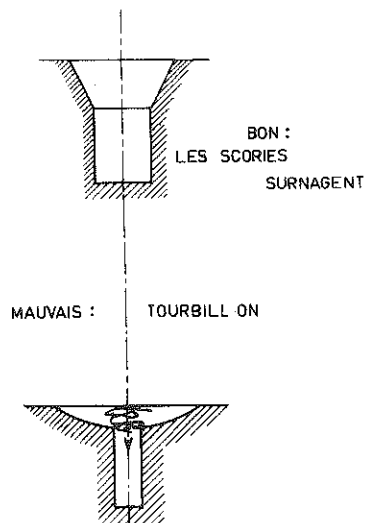
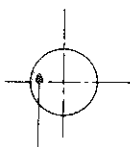
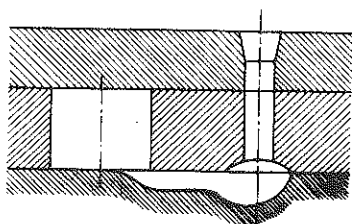


Fig. 61

13.3. Coulée en pluie (FON 10) \rightarrow pièces de grande hauteur

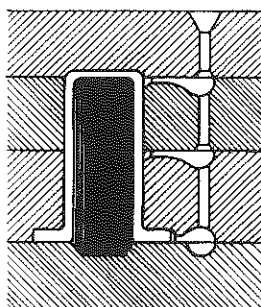
13.4. Coulée en source et à talon



pièces circulaires : attaque tangentielle \rightarrow fonte tourbillonne

Fig. 62

13.5.



Talons superposés : ramène fonte chaude au-dessus dès que le niveau est atteint \rightarrow refroidissement + uniforme des pièces hautes

Principe : la température doit être aussi uniforme que possible.

Fig. 63

14. Masselottes

Le rôle des masselottes est de compenser le retrait volumique à l'état liquide. Ceci suppose, naturellement, que la masselotte se solidifie moins vite que la pièce. Ici s'introduit la notion de *module* d'une pièce. La chaleur à évacuer lors de la solidification dépend du volume V de la pièce. Cette chaleur doit nécessairement passer par sa surface. On conçoit donc que le rapport

$$m = \frac{V}{S}$$

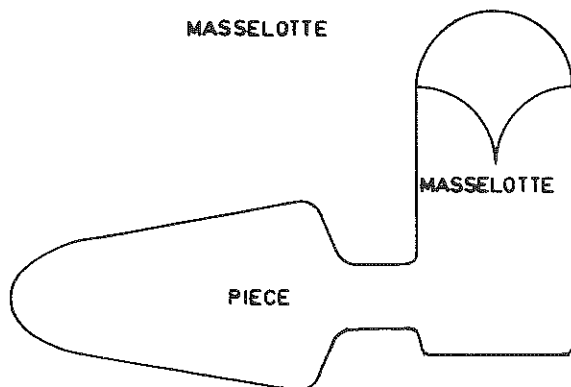
appelé *module*, joue un grand rôle. Selon CHWORINOFF, on peut admettre la relation

$$t_{\text{solidification}} = km^2$$

où k , constante de CHWORINOFF, dépend de la température de solidification, et des matériaux de la pièce et du moule.

La masselotte devra donc avoir un module supérieur à celui de la pièce alimentée. Une condition raisonnable est

$$m_{\text{masselotte}} > 1,2 m_{\text{pièce}}$$



La masselotte doit être disposée de telle sorte qu'à son niveau minimum, après retrait, elle mette encore la pièce sous pression, sans quoi la retassure aura lieu dans la pièce.

Fig. 64

Le volume de la masselotte doit compenser largement le retrait à l'état liquide. On posera

$$V_{\text{mass}} = 6 r V_{\text{pièce}}$$

où r est le retrait volumique de la pièce, dont voici quelques valeurs indicatives.

Valeurs moyennes du retrait volumétrique r

(Retrait liquide + contraction de solidification)

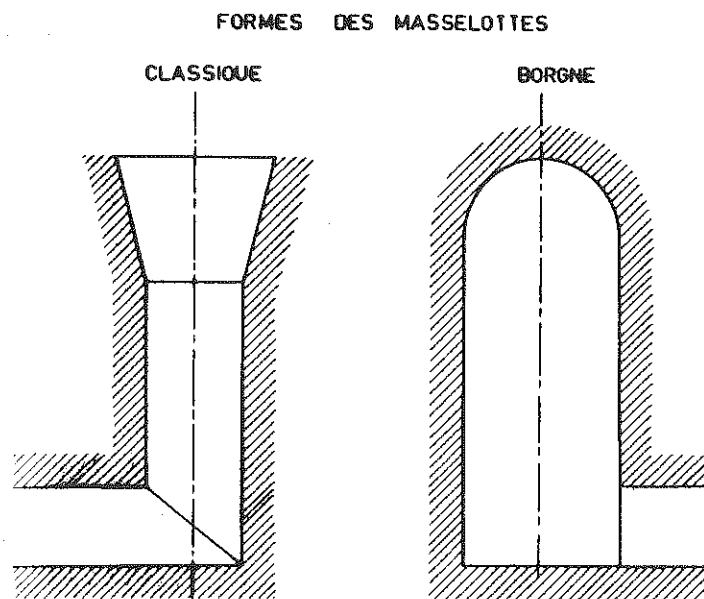
Ft	{	graphite lamellaire	0,01 0,03
		sphéroïdal	0,03 0,04
		blanche	0,04 0,06

AC	{	non allié	0,1 % C	0,05 0,07
			0,3 % C	0,04 0,06
		allié		0,06 0,10

Cu - Zn (Bz)	0,04 0,05
Cu - Al (cupro-aluminium)	0,04
Cu - Zn (Laiton)	0,06 0,07

Al - Cu	0,04 0,07
Al - Mg	0,06 0,07
Al - Si	0,035 0,05

Les masselottes ont les formes suivantes



classique

borgne (la surface hémisphérique donne un grand module)

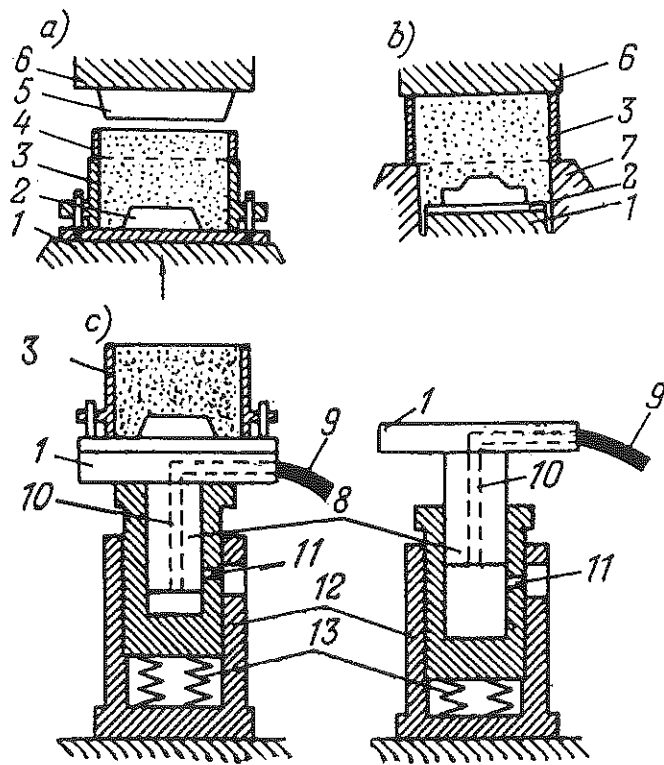
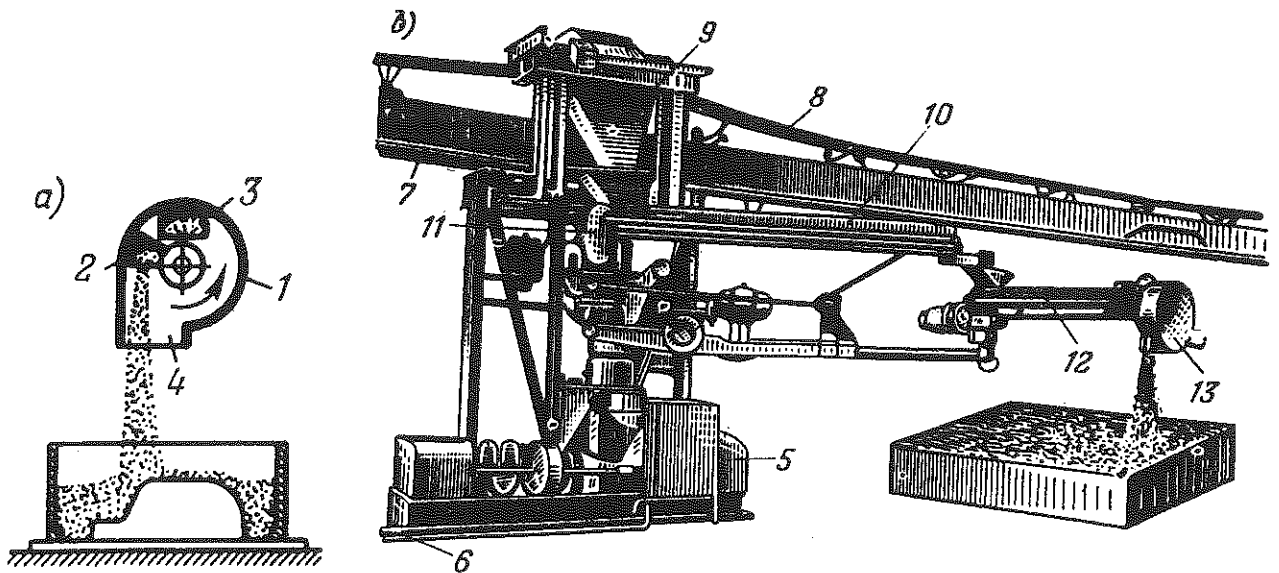


Schéma du moulage mécanique

Fig. 66



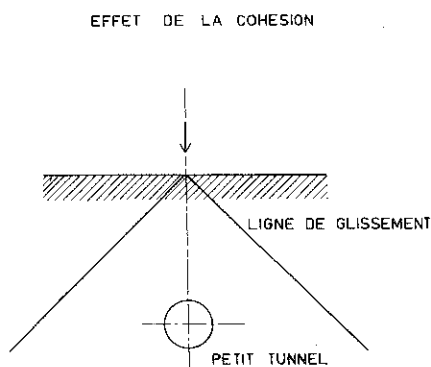
Sableuse à console mobile

a — schéma du fonctionnement de la tête; b — schéma du fonctionnement de la sableuse

Fig. 67

15. Moulage mécanique

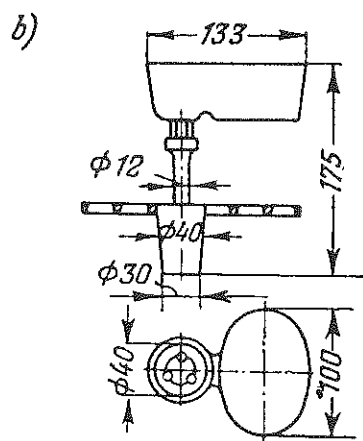
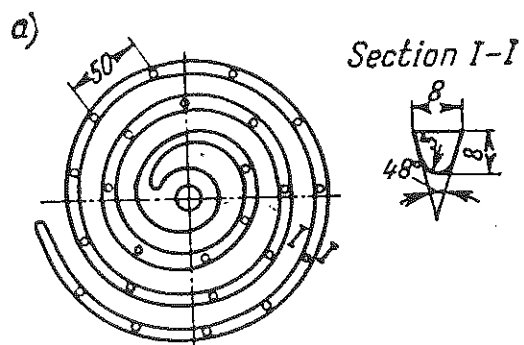
- a) On peut tasser le sable à la presse. Il faut alors ménager une *rehausse* au châssis. L'inconvénient de ce procédé est que le sable est plus tassé dans le haut du moule qu'au voisinage de la pièce (cf. petits tunnels)



- b) On peut également tasser le sable par vibrations. Le tassement se fait alors dans la masse. A cet effet, on emploie un dispositif à échappement d'air.

- c) On peut également envoyer le sable sous pression.

- 1 = protecteur de tête
- 2 = ailette
- 3 = trou d'arrivée du sable
- 4 = échappement
- 5 = chariot
- 6 = rail
- 7 = poutre supérieure
- 8 = courroie transporteuse
- 9 = trémie
- 10 = transporteur à bande
- 11 = axe de pivotement
- 12 = transporteur à bande
- 13 = tête



Spirale pour l'essai
de coulabilité
a — spirale; b — jets de coulée

16. Essai de coulabilité

Les recherches sur la coulabilité, c'est-à-dire, la capacité d'un métal en fusion de prendre la forme du moule, se font à l'aide d'une *spirale de SIPP*. Dans cet essai, on mesure la longueur de spirale remplie par la fonte.

Pour la fonte à graphite lamellaire, les recherches ont montré que *la coulabilité s'améliore si*

- la température de coulée est plus élevée
- la teneur en C ↑
- la teneur en P ↑
- l'intervalle de solidification ↓ (intervalle entre liquides et solides sur le diag. de phase)

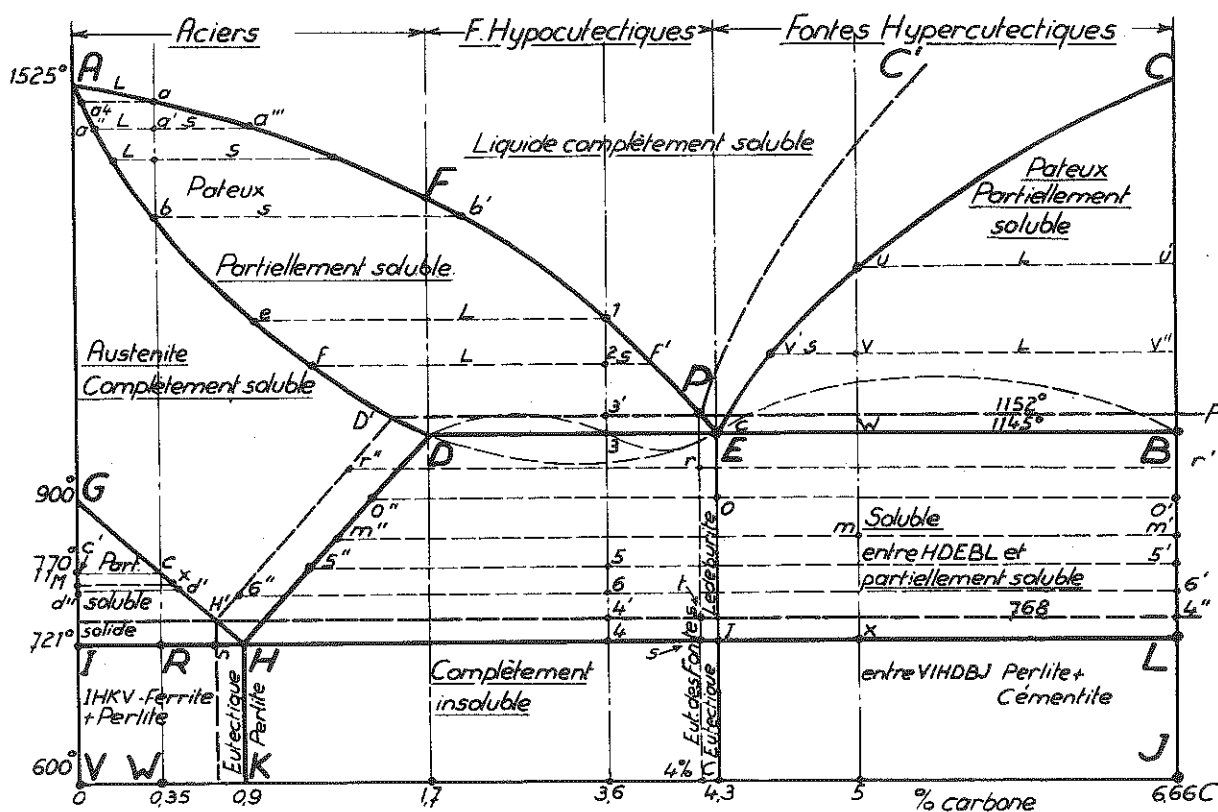


Fig. 70

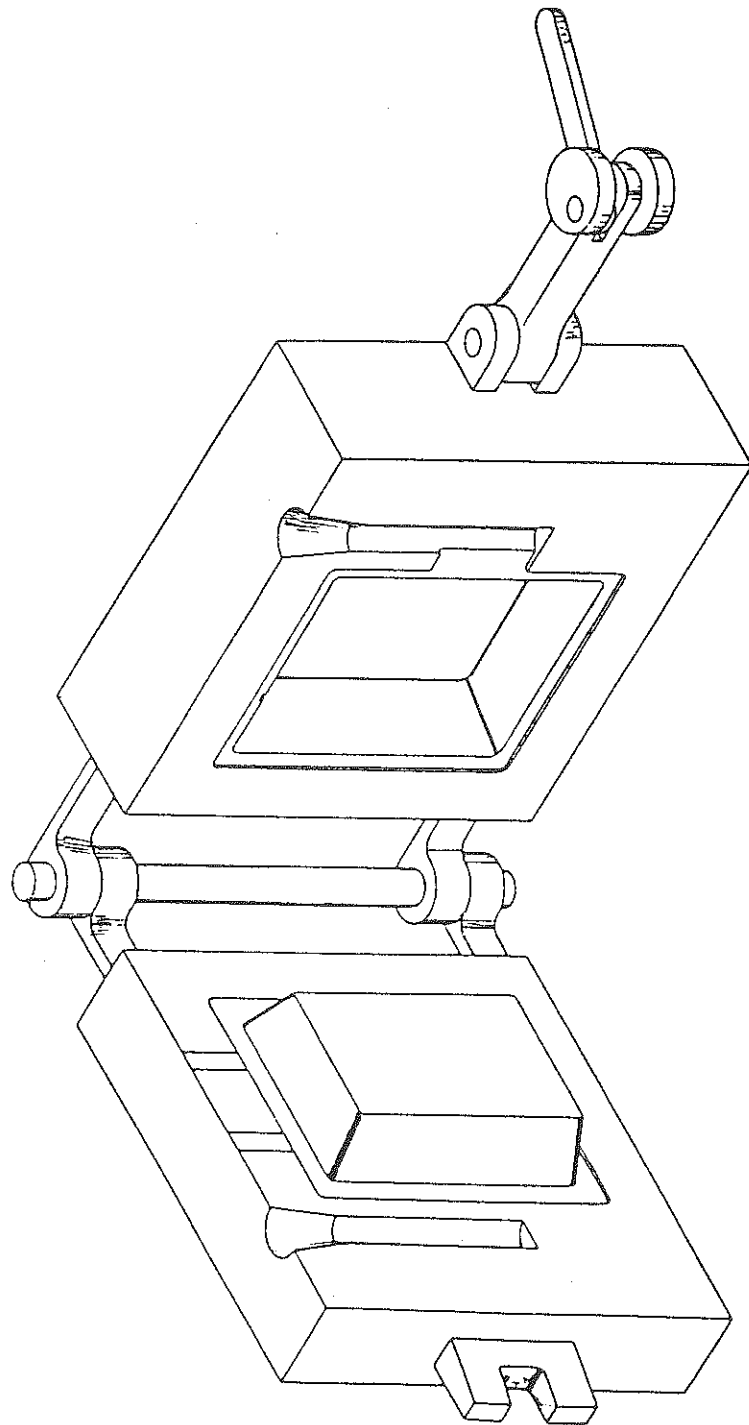


Fig. 71

17. Moulage en coquilles

A la place de moules perdus, on peut également utiliser des moules métalliques permanents appelés *coquilles*. Celles-ci, en acier réfractaire, peuvent être réalisées par moulage, enlèvement de copeaux, usinage électrolytique ou électro-érosion. Lorsque l'on parle de moulage en coquilles sans autre précision, l'amenée de la fonte est simplement due à la pesanteur. On prendra garde au fait que *le trou de coulée doit se trouver au joint du moule, sous peine de ne pouvoir démouler*. Il en est de même des événements. Ceci impose en pratique un *joint vertical*.

Le moulage en coquilles s'applique surtout aux alliages légers (Al, Mg), aux alliages de cuivre et de zinc, et peut s'utiliser pour les matériaux ferreux à haut carbone.

Ce procédé ne convient que pour les séries suffisantes, car la réalisation des moules est onéreuse. En contre-partie, il n'est plus nécessaire de fabriquer un moule par pièce, l'état de surface est bon et nécessite peu d'ébarbage.

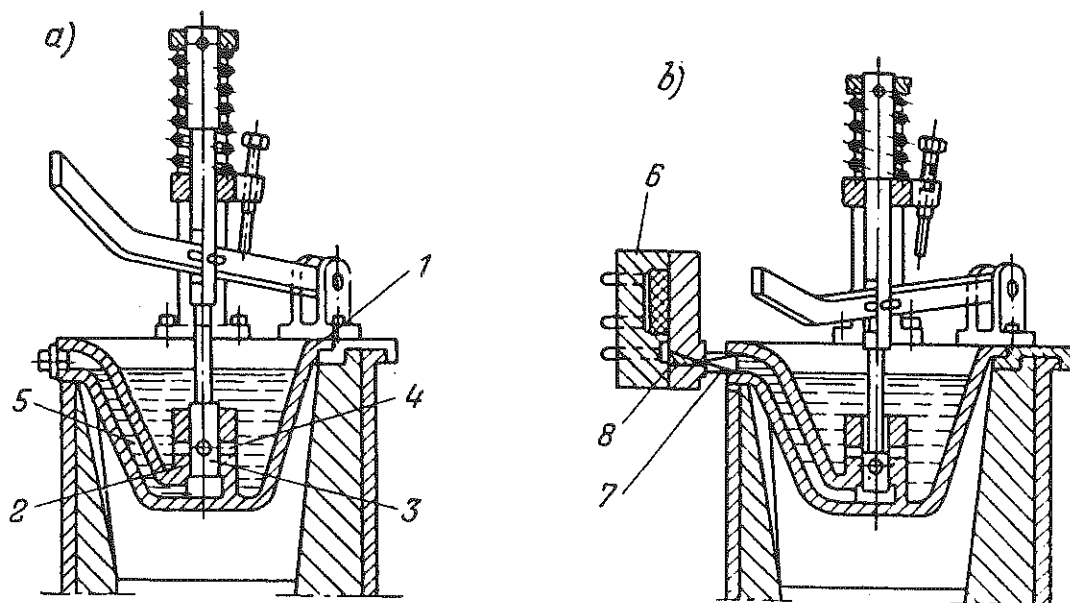
Le moule est généralement réalisé en fonte contenant jusqu'à 3,5 % de carbone, de préférence sous forme de graphite, car ce dernier facilite le démoulage. Les *noyaux* métalliques se font en *acier au chrome-vanadium*. Il faut se rappeler que, lors de son refroidissement, *la pièce serrera le noyau*. Celui-ci doit donc être *conique*, sans quoi on ne pourra le retirer.

Le moulage en coquilles a une forte tendance à provoquer des *retassures*.

- le moule n'est pas poreux ! Pour les éviter, il faut prendre un certain nombre de précautions.
- le moule doit être préchauffé
- le chemin de coulée doit être aussi long que possible, pour éviter les turbulences
- il ne faut pas oublier les événements !
- le moulage doit se faire à une température relativement basse, c'est-à-dire à peine supérieure à la température de fusion.

Le refroidissement en coquilles est plus rapide qu'en sable. On tend donc à obtenir des fontes *blanches* (diagr. métastable).

Additions favorisant l'équilibre labile : Mn, Cr
stable : Si, Al



Machine à piston pour mouler sous pression
a — schéma de fonctionnement; *b* — remplissage du moule par le métal

Fig. 72

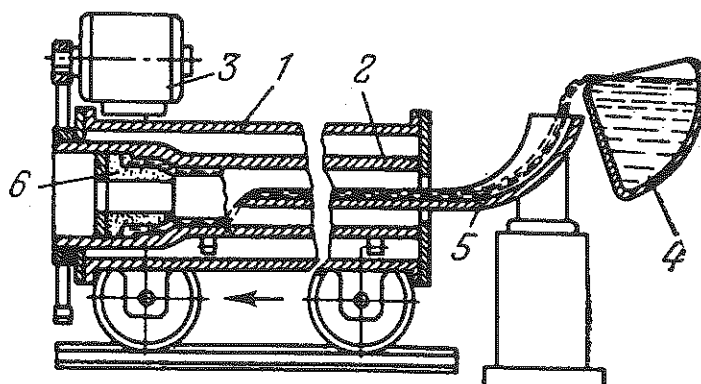


Schéma de la coulée centrifuge des tubes
 1 — blindage; 2 — coquille rotative; 3 — moteur électrique; 4 — poche; 5 — gouttière;
 6 — noyau de sable

Fig. 73

18. Moulage sous pression

Lorsque la forme est compliquée, lorsqu'elle a des parties très minces, bref, lorsque le métal en fusion ne pourra que très difficilement remplir le moule, on l'y force en l'introduisant *sous pression*. Le moule est, dans ce cas, métallique, et maintenu fermé dans une presse. La pression peut aller de 20 à 600 bar.

La figure représente le procédé dit à *chambre chaude*, où le réservoir est alimenté par du métal solide et chauffé par-dessous. Ce procédé s'utilise surtout pour Pb, Sn, Zn, Mg. Il existe également un procédé à *chambre froide* où le métal en fusion est injecté dans le cylindre de pompe. Ce procédé s'utilise pour Cu, Al (Fe).

Le moulage sous pression ne s'applique qu'à partir de 5000 pièces à réaliser.

19. Moulage centrifuge

Le procédé s'applique pour réaliser certaines pièces de révolution.

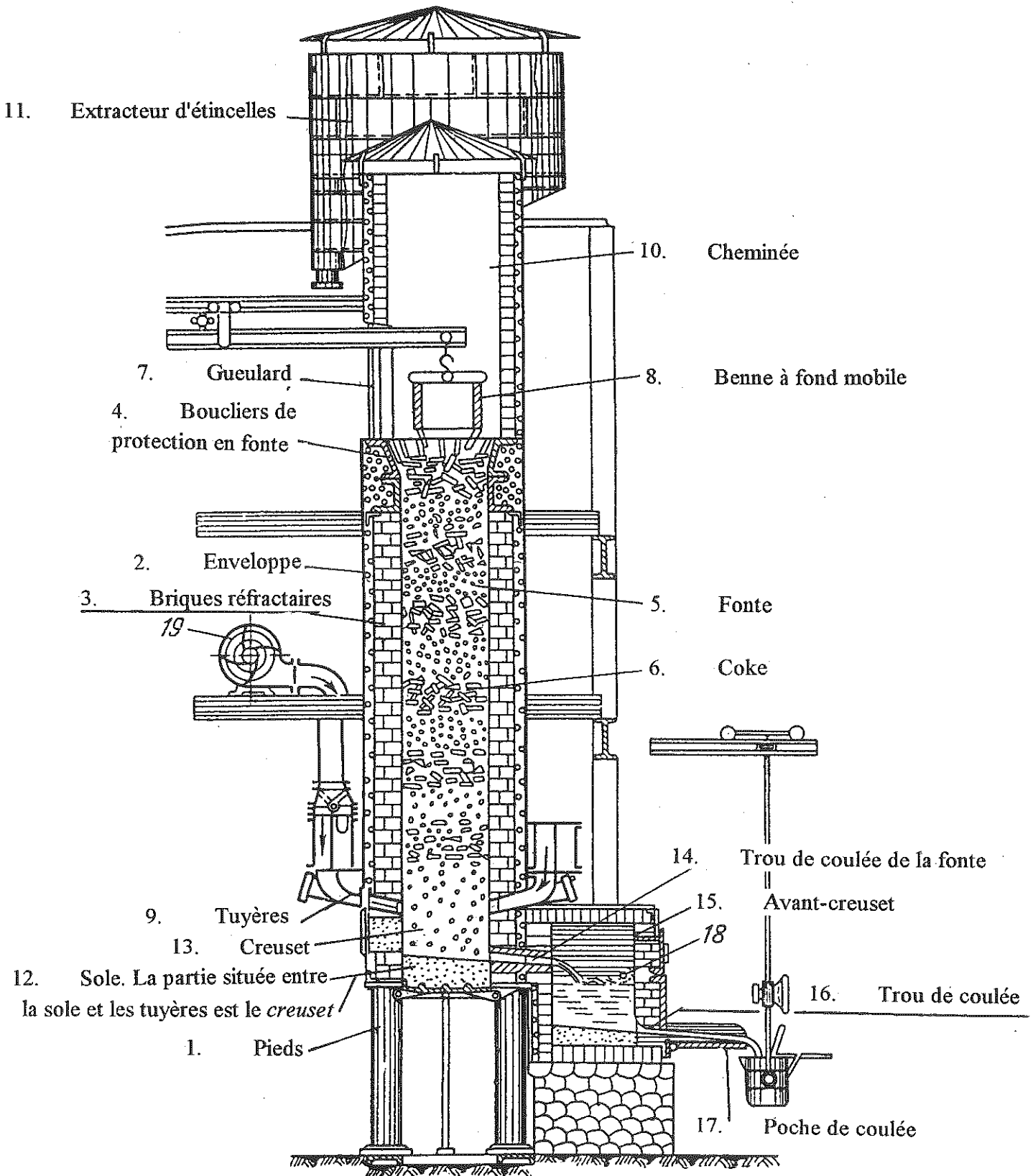


Schéma d'un cubilot

20. Cubilot

La fonderie s'alimente en fonte de haut fourneau, qu'elle fait refondre, en y ajoutant en général une certaine proportion de ferraille. Cette *seconde fusion* se fait le plus souvent dans un *cubilot*, dont voici les différentes parties :

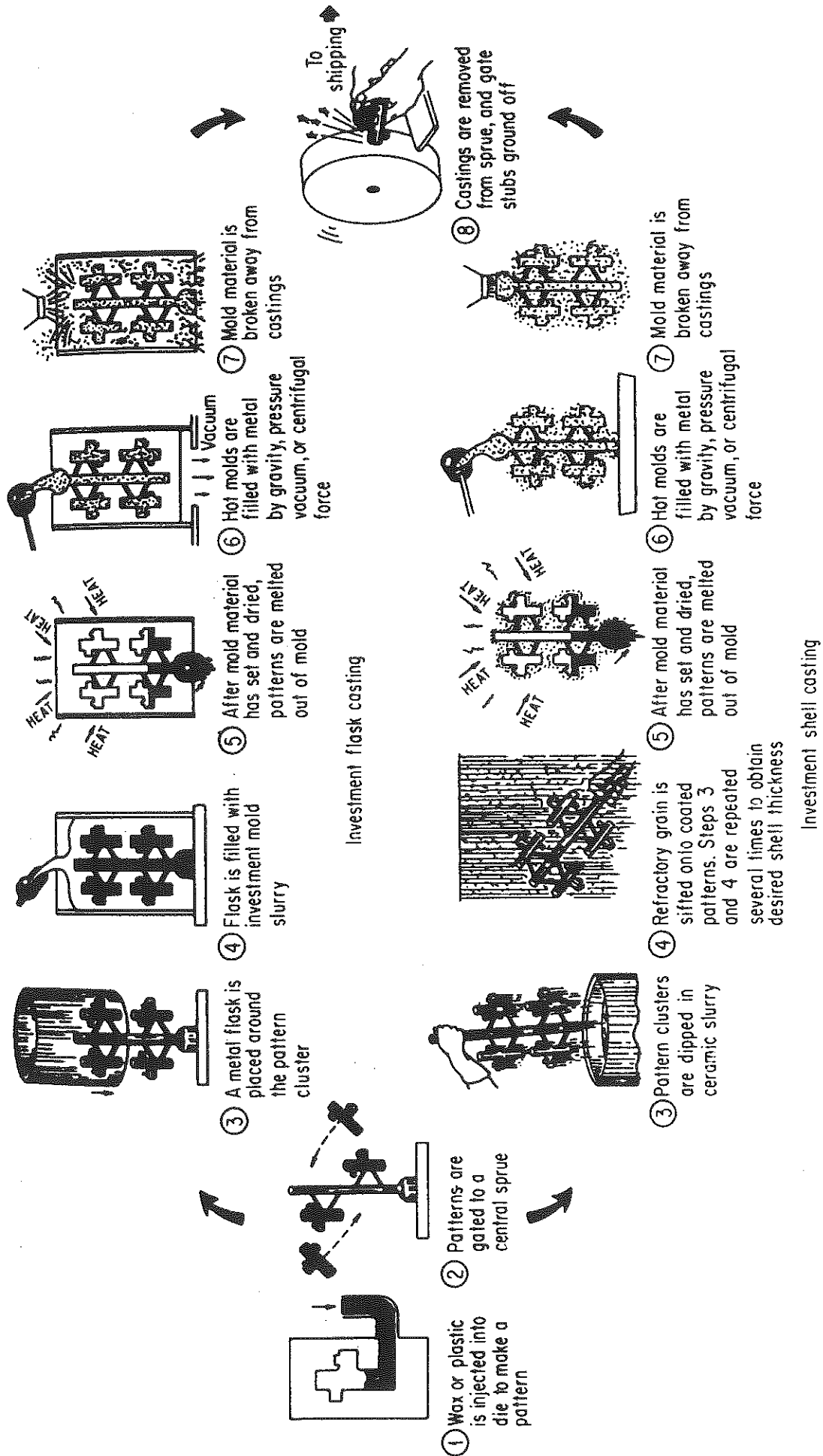
1. Pieds
2. Enveloppe
3. Briques réfractaires
4. Boucliers de protection en fonte
5. Fonte
6. Coke
7. Gueulard
8. Benne à fond mobile
9. Tuyères
10. Cheminée
11. Extracteur d'étincelles
12. Sole. La partie située entre la sole et les tuyères est le *creuset*
13. Creuset
14. Trou de coulée de la fonte
15. Avant-creuset
16. Trou de coulée
17. Poche de coulée

La *hauteur utile* est la distance de l'axe des tuyères au bas du gueulard.

La sole est soutenue par une béquille. En enlevant la béquille, on ouvre la sole et le cubilot se vide. En effet, contrairement au haut fourneau, le cubilot a un fonctionnement discontinu, par exemple, $\frac{1}{2}$ jour par semaine.

Le métal atteint une température de 1650°C à l'alimentation d'air. Dans le creuset, on atteint 1460°C à 1500°C. Les gaz peuvent atteindre 1700°C.

La poche de coulée doit être *bien sèche*, sous peine de provoquer une effervescence très dangereuse. Aussi, on la passe préalablement à l'étuve. Ce procédé garantit aussi un moindre refroidissement de la fonte. Le refroidissement de la fonte dans la poche est de l'ordre de 150°C.



Steps in investment-casting processes.

Fig. 75

21. Moulage à cire perdue (fonderie fine)

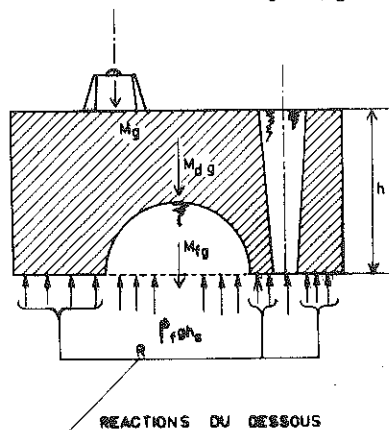
Le moulage à cire perdue se caractérise par un modèle non récupéré, en cire ou matière plastique. Ce modèle peut être réalisé par assemblage, ce qui permet une très grande complexité de forme. Il ne faut pas le décocher, car on le fait fondre. Par conséquent, tout problème de dépouille, par exemple, est écarté. On arrive, par ce procédé, à une grande précision (celle-ci dépend de la finesse du sable).

Le moule peut être massif, en sable, ou avoir la forme d'une coque céramique obtenue en plongeant le modèle dans la céramique liquide (moulage en carapace). Le moule est également perdu.

Pour la fabrication en série, on pratique souvent le moulage en grappe.

22. Calcul des forces soulevant le dessus

22.1. En l'absence de noyau; joint plat



Equilibre vertical : $M_f = \rho_f V_f$

$$Mg + M_{Dg} + \rho_f g V_f = \rho_f ghS + R$$

En l'absence de fonte et de poids, on a $R = M_D g$.

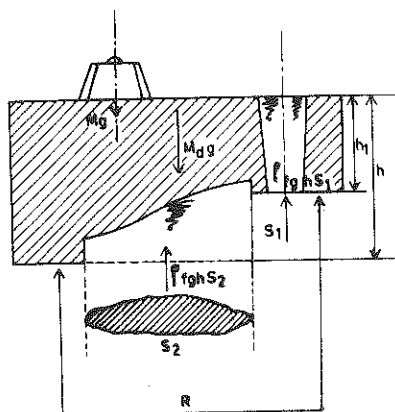
Fig. 76

Si l'on admet que cette réaction est suffisante pour assurer l'étanchéité, on dimensionnera les poids pour la maintenir égale à elle-même, ce qui conduit à la condition

$$Mg = \rho_f ghS - \rho_f gV_f$$

$$M = \rho_f (Sh - V_f)$$

22.2. Pas de noyau, joint gauche



$$Mg + M_{Dg} + \rho_f V_f g = \rho_f gh_1 S_1 + \rho_f gh S_2 + R$$

En faisant encore $R = M_{Dg}$, on trouve

$$Mg = \rho_f g (h_1 S_1 + h S_2 - V_f)$$

$$M = \rho_f (h_1 S_1 + h S_2 - V_f)$$

Fig. 77

22.3. Effet du noyau : ajouté la poussée d'Archimède

→ le noyau est fléchi. C'est pourquoi il faut souvent l'armer.

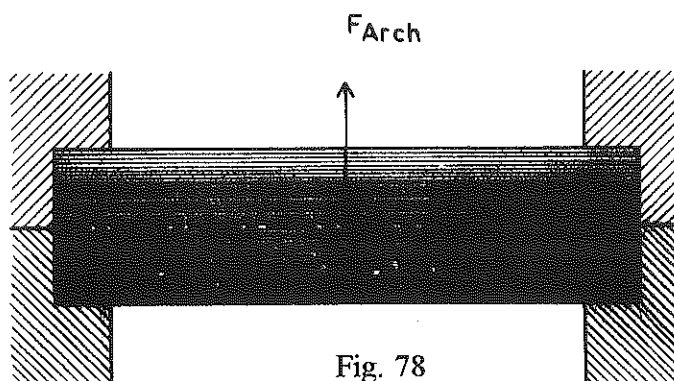


Fig. 78

23. Opérations après moulage

- a) Le *démoulage* est plus facile si le sable est vert que s'il est étuvé. Dans ce dernier cas, il faut prendre garde, en cassant le sable, à ne pas casser les parties saillantes de la pièce.

On doit impérativement attendre que la pièce soit *suffisamment froide*, sinon on court le risque de voir la pièce se briser lors d'un refroidissement trop brusque à l'air. Les grosses pièces, de 5 à 25 tonnes, doivent rester 3 à 8 jours dans le sable.

- b) Le *dessablage* se fait au jet de sable sec ou au jet d'eau.
- c) L'*ébarbage* consiste à enlever les jonctions des chenaux de coulée, les événements, les masselottes, les bavures. Il se fait à la lime, au burin à main, à la meule, au burin pneumatique.

24. Epaisseur minimale des pièces en fonderie

Le métal liquide ne peut pénétrer dans des formes trop minces, ainsi que nous l'avons vu. Voici quelques valeurs indicatives à ce sujet.

1. Pour les *aciers*, si L est la longueur de la paroi, il faudra lui donner une épaisseur minimale

$$e = 6 \text{ mm} + 0,008 L$$

2. Pour les *fontes*, qui sont plus coulables, on peut se contenter de

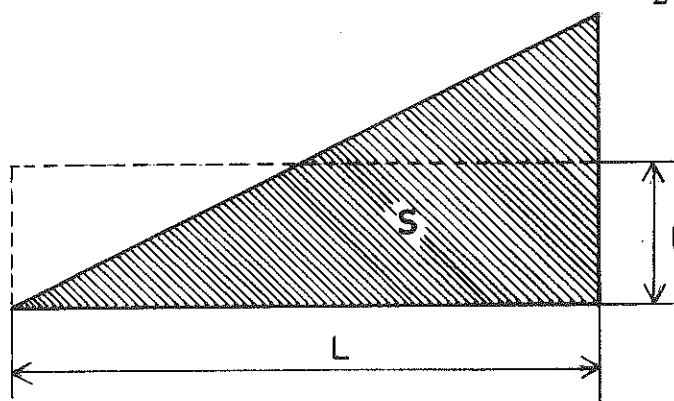
$$e = 4 \text{ mm} + 0,0036 L$$

3. Pour les *alliages légers*, soit L la longueur du voile, et l sa largeur équivalente

$$l = S/L$$

On définit alors, avec ROINET, sa *dimension de référence*

$$D = \frac{L+l}{2}$$



Les épaisseurs minimales sont alors données par le tableau suivant :

Alliage	Moulage en sable		Moulage en coquilles
	$D \leq 200 \text{ mm}$	$D \geq 200 \text{ mm}$	
A - S13, A - U854	$1,25 \text{ mm} + 0,013 D$	$2,5 \text{ mm} + 0,007 D$	$0,018 D$
A - S5U3, A - S10G, A - S4G	$1,1 \text{ mm} + 0,016 D$	$3 \text{ mm} + 0,0068 D$	$0,09 \text{ mm} + 0,018 D$
A - U5GT	$1,35 \text{ mm} + 0,018 D$	$3,9 \text{ mm} + 0,0048 D$	$1,6 \text{ mm} + 0,018 D$

Fig. 79

25. Règles de dessin des pièces moulées

25.1 Règles liées au retrait

Examinons le processus de solidification de la pièce ci-contre. Les parties périphériques se solidifient les premières, alors que la partie centrale a ses dimensions de corps liquide. En se refroidissant, puis en se solidifiant, la partie centrale se trouve donc en dépression. Dans le meilleur des cas, elle sera le siège de contraintes de traction. Mais si, à l'état liquide, elle est le siège d'une dépression trop intense, la fonte se vaporisera, on aura une *retassure*.

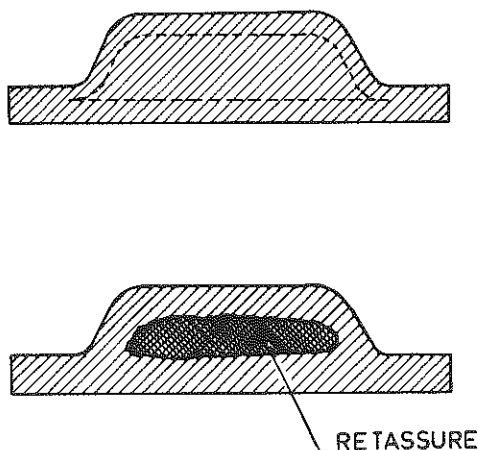


Fig. 80

Pour éviter ce genre de problèmes, il convient de dessiner la pièce de manière à éviter les trop grandes différences d'épaisseurs, par exemple comme indiqué ci-contre.

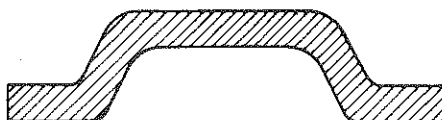


Fig. 81

Les mêmes difficultés se rencontrent aux raccords d'angles.

On peut s'aider, pour évaluer un tracé des cercles inscrits $\left(m = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{d}{4} \right)$.

On s'efforcera de ne pas dépasser un accroissement de 60 % en surface sur 10 mm.

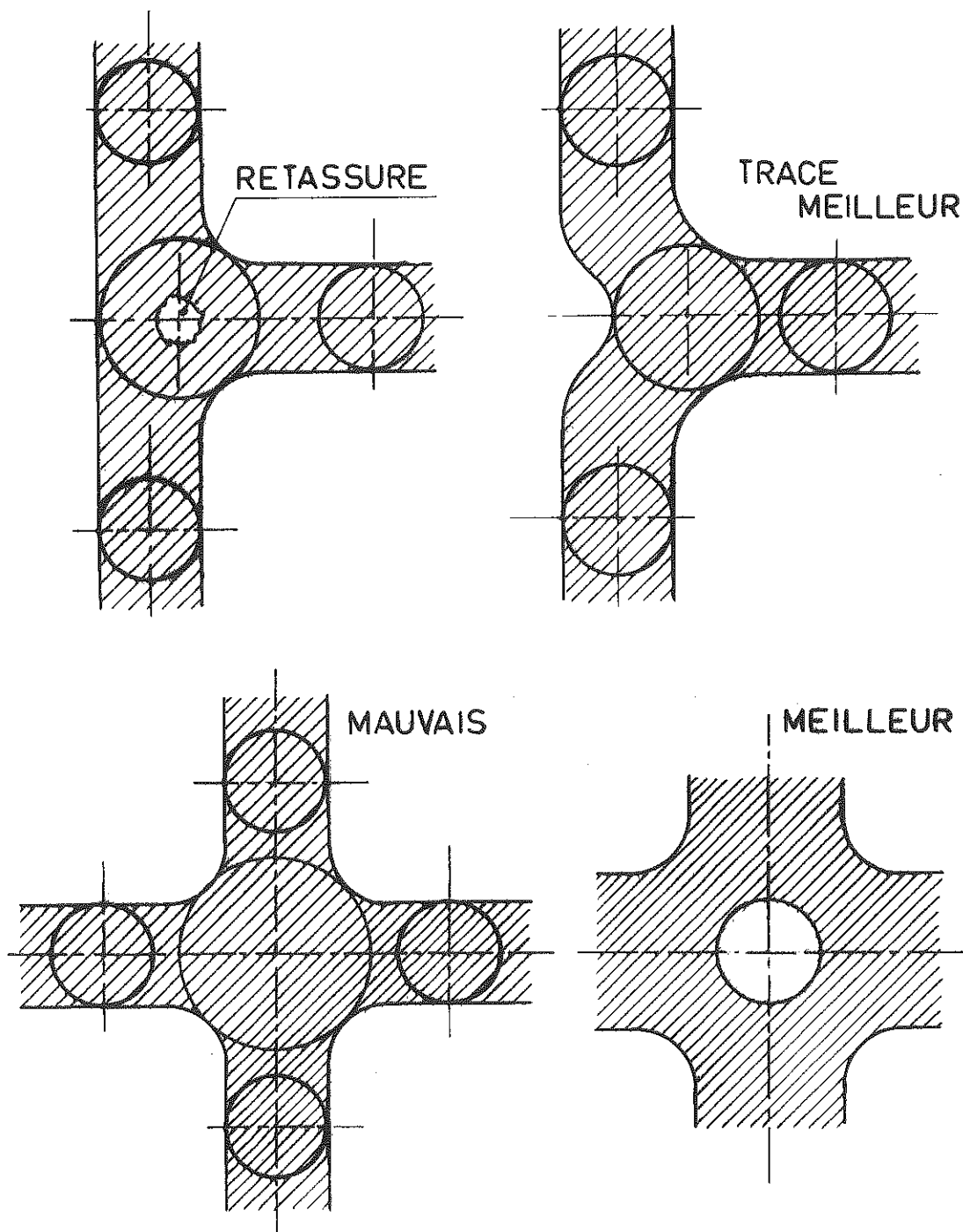
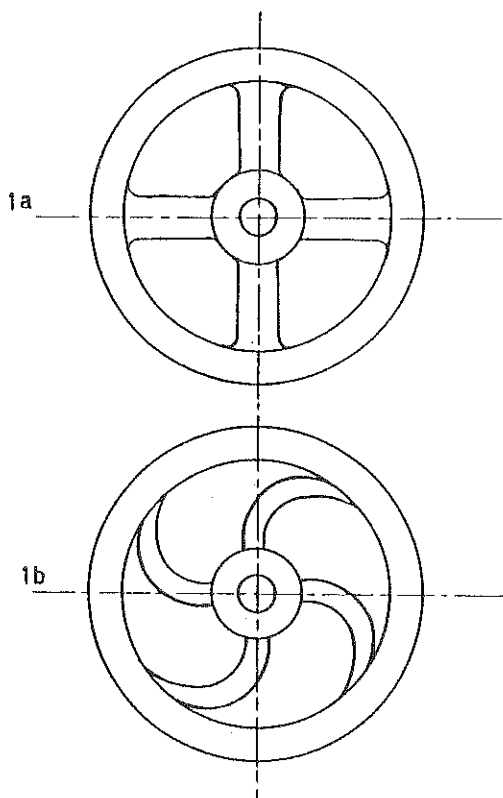


Fig. 82

Voyons à présent le problème des contraintes résiduelles.



Dans la poulie à bras ci-contre, la jante se solidifiera rapidement, de même que les bras. Le noyau, plus massif et situé plus loin des bords du moule, se solidifiera en dernier lieu. Il en résultera de fortes contraintes de traction dans les bras. On améliore la situation en faisant des bras courbes ou en déportant le noyau. En prenant un nombre *impair* de bras, on empêche également leur opposition directe.

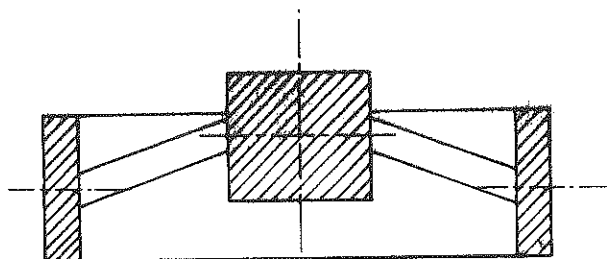


Fig. 84

Fig. 83

25.2 Règles liées à la résistance à la traction

Le dessin des pièces doit tenir compte du fait que la fonte résiste mal à la traction.

Soit à faire une console capable de porter une charge verticale. Le tracé A est meilleur que le tracé B, car les contraintes dans la mesure y sont en compression.

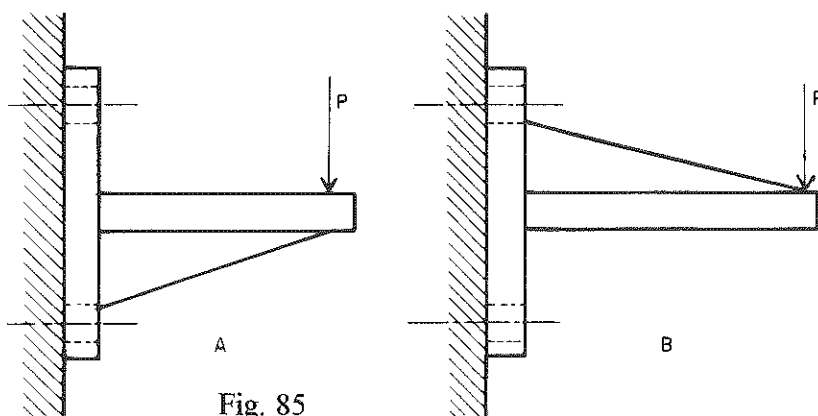


Fig. 85

Bibliographie - Fonderie

1. A. CAMPA : *Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens. Tome I.* Foucher, Paris, 1971.
2. G. FACY, M. POMPIDOU : *Précis de fonderie.* AFNOR, Paris, 1983.
3. L. GIAI-BRUERI : *Fonderie. Eléments fondamentaux.* Dunod Génie Mécanique, Paris, 1983.
4. C.O. HERB : *Die - Casting.* The Industrial Press, New York, 1936.
5. E.D. HOWARD : *Modern Foundry Practice.* Odhams Press Limited, Long Acre, London, W.C.2.
6. W. KOENIG : *Fertigungsverfahren - Band 4 : Massivumformung.* VDI - Verlag, Düsseldorf, 1983.
7. F. OUVRARD, H. LE BRETON : *Pour le fondeur.* Dunod, Paris, 1954.
8. P. POLOUKHINE *et al.* : *Technologie des métaux.* Mir, Moscou, 1967.
9. C^{el} J. ROUELLE : *La fonte.* Armand Colin, Paris, 1921
10. R. WLODAWER : *Gelenkte Erstanung von Gußeisens.* Gießerei - Verlag, Düsseldorf, 1977.

4. FORGE

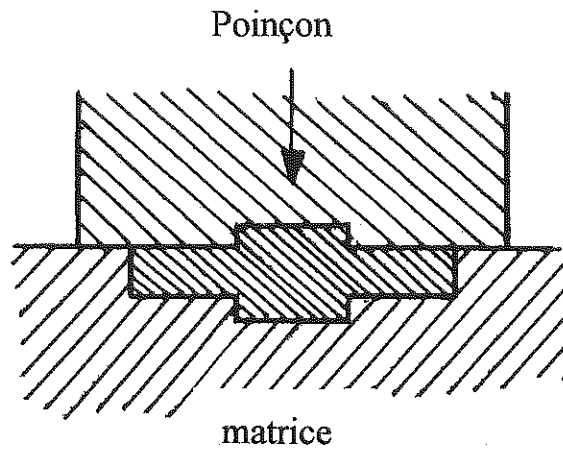


Fig. 86



Répartition des fibres dans un vilebrequin
 a – usinage par coupe; b – forgeage (matriçage)

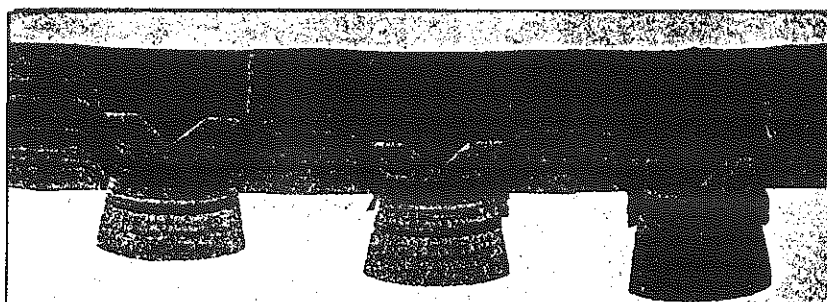
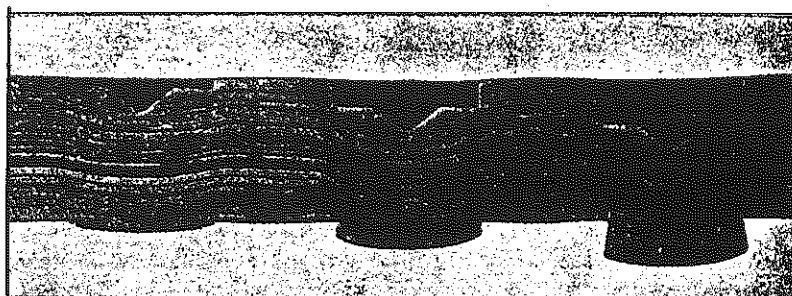
Fig. 87

Forgeage

1. Le forgeage est un procédé dans lequel on provoque une déformation *plastique dans la masse* d'une pièce, capable de modifier toutes ses dimensions (Massivumformung). Nous traiterons à part le travail des métaux en feuilles (Blechumformung) dans lequel une dimension, l'épaisseur, est à peu près maintenue. On distingue le forgeage *libre* et le forgeage *en matrice*.
2. Les métaux sont composés de cristaux qui, à l'état naturel, ont des formes quelconques. Par déformation plastique, on provoque un allongement des cristaux dans la direction de plus grand allongement : ce sont les *fibres*. La résistance dans le sens des fibres est meilleure que dans le sens perpendiculaire. La figure ci-contre illustre la répartition des fibres que l'on obtient par usinage et par forgeage. La répartition obtenue dans ce dernier cas est bien plus favorable.

ESSAI DE CORROSION — INFLUENCE DES DÉFORMATIONS ET DU MODE DE FABRICATION

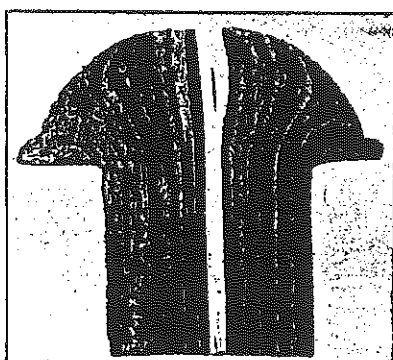
Fig. 88



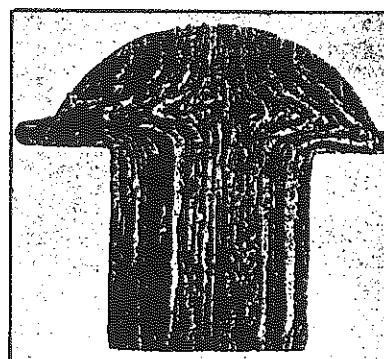
Etude des déformations.

Phases successives du poinçonnage d'une barre de fer puddlé (FREMONT).

Attaque rapide à l'acide chlorhydrique pur.



Rivet posé au marteau.



Rivet posé à la machine.

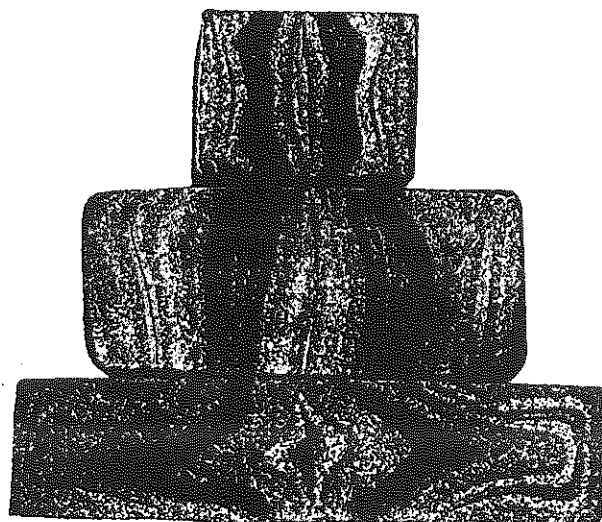
Influence du mode de travail sur l'arrangement des fibres.

Rivets posés à chaud (FREMONT).

METALLOGRAPHIE

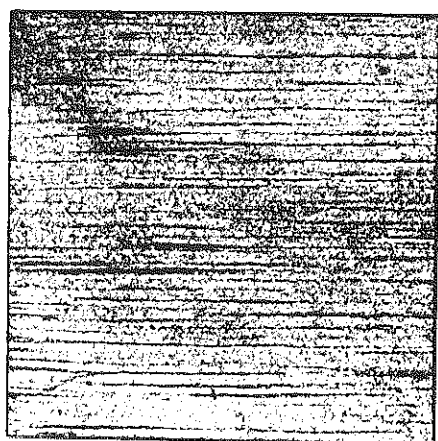
Fig. 89

ESSAI DE CORROSION — INFLUENCE DU MODE DE FABRICATION



Aciers de différentes nuances soudés entre eux, puis aplatis.
Attaque prolongée au réactif de Benedicks.

Fig. 90



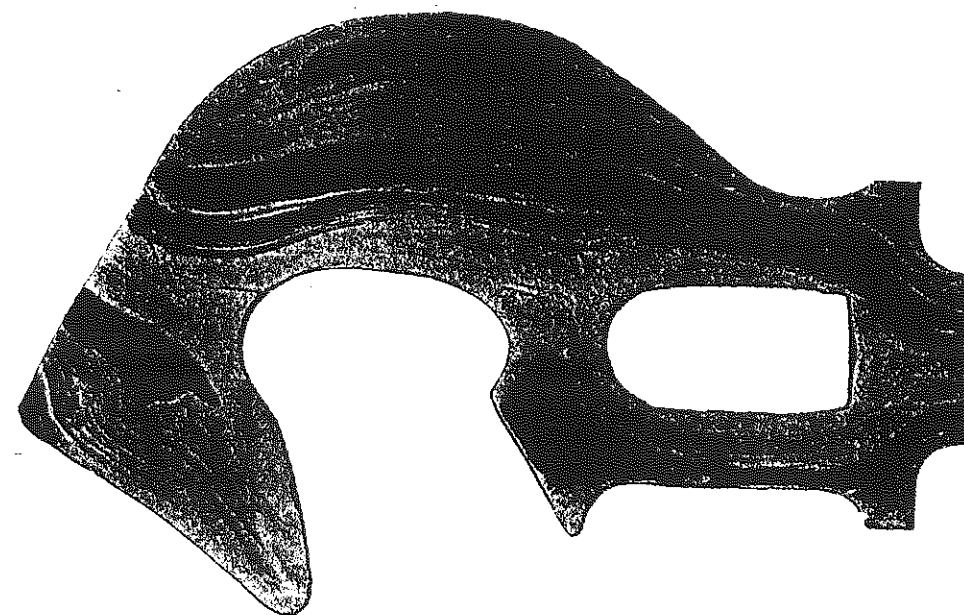
Acier mangano-siliceux;
coupe dans le sens du laminage.
Attaque au réactif de Benedicks. — Eclairage oblique.



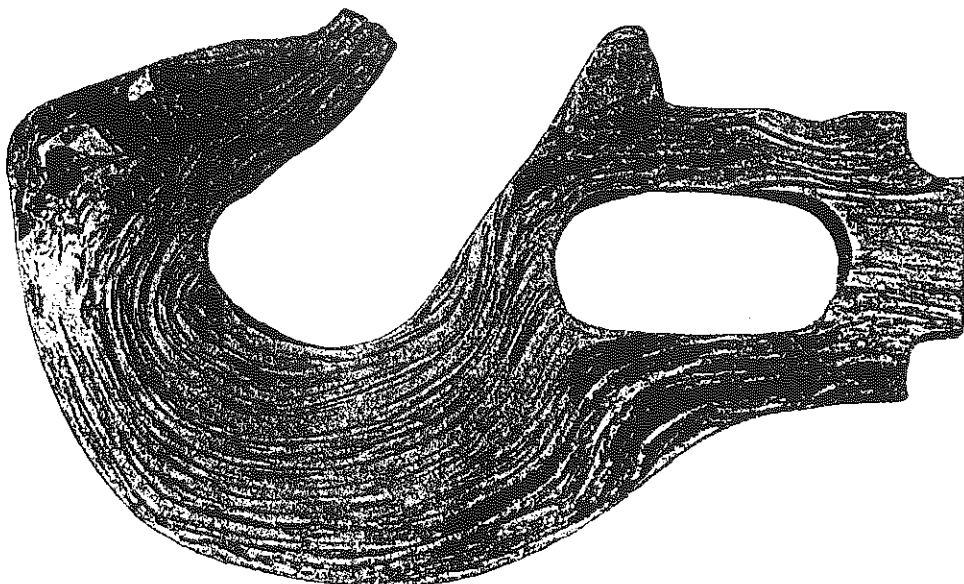
Pièce forgée
avec morceau rapporté par soudure

Fig. 91

ESSAI DE CORROSION — INFLUENCE DU MODE DE FABRICATION

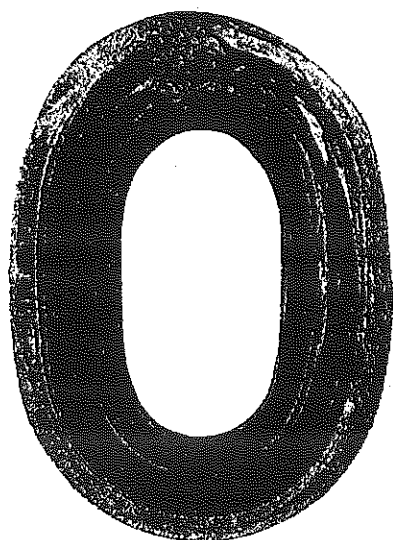


Influence du mode de fabrication.
Crochet de traction rompu en service (FREMONT).

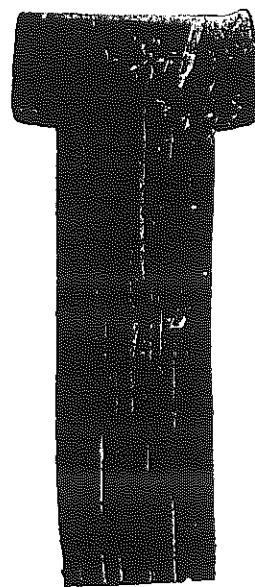


Influence du mode de fabrication.
Crochet de traction (FREMONT).

ESSAI DE CORROSION — INFLUENCE DU MODE DE FABRICATION

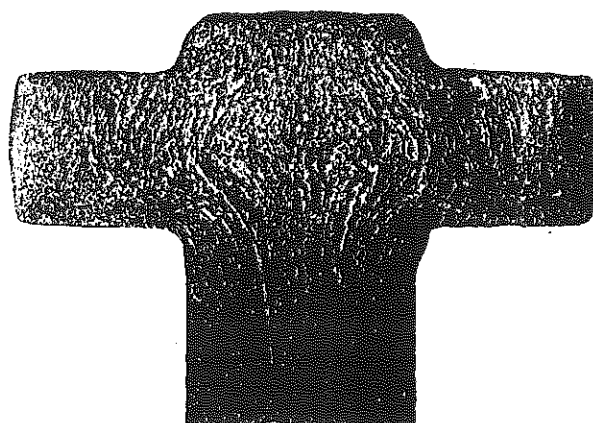


Influence du mode de fabrication.
Maillon de chaîne.
Attaque à la solution iodée.



Fragment de bielle d'automobile.
Attaque à la solution iodée.

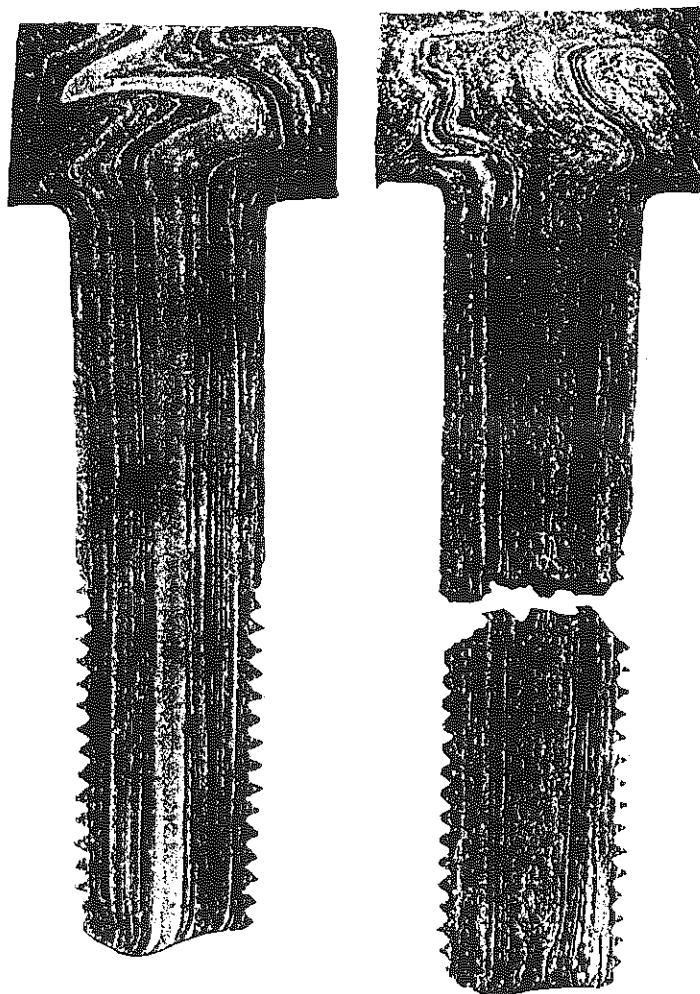
Fig. 93



Tête d'arbre à la cardan d'automobile. Attaque lente.

Fig. 94

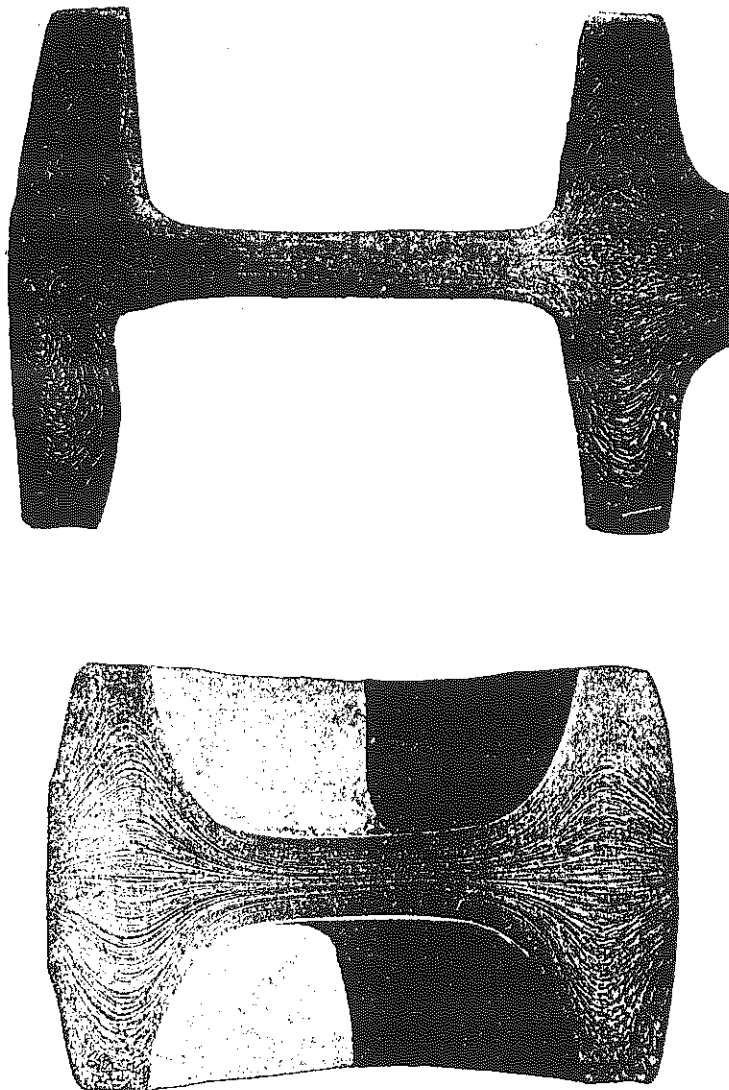
ESSAI DE CORROSION — INFLUENCE DU MODE DE FABRICATION
ET DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ CHIMIQUE



Attaque prolongée à l'acide picrique de boulons rompus en service
(Hétérogénéité chimique, scories, gros grains, mode de fabrication).

MACROSTRUCTURE DES ACIERS FORGÉS

Attaques au réactif Stead-Le Chatelier.



Sections de bielles de moteurs d'automobiles.
Acier demi-dur estampé.

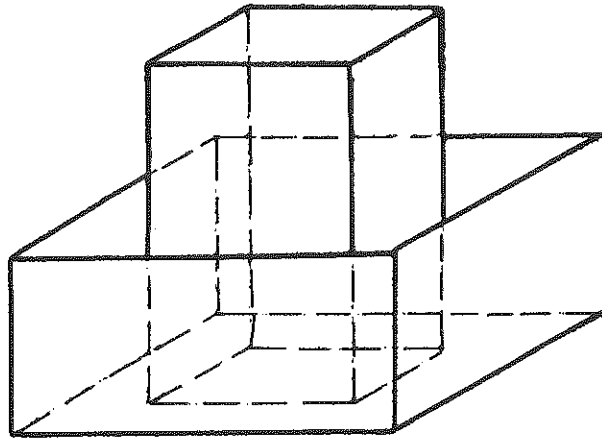


Fig. 97

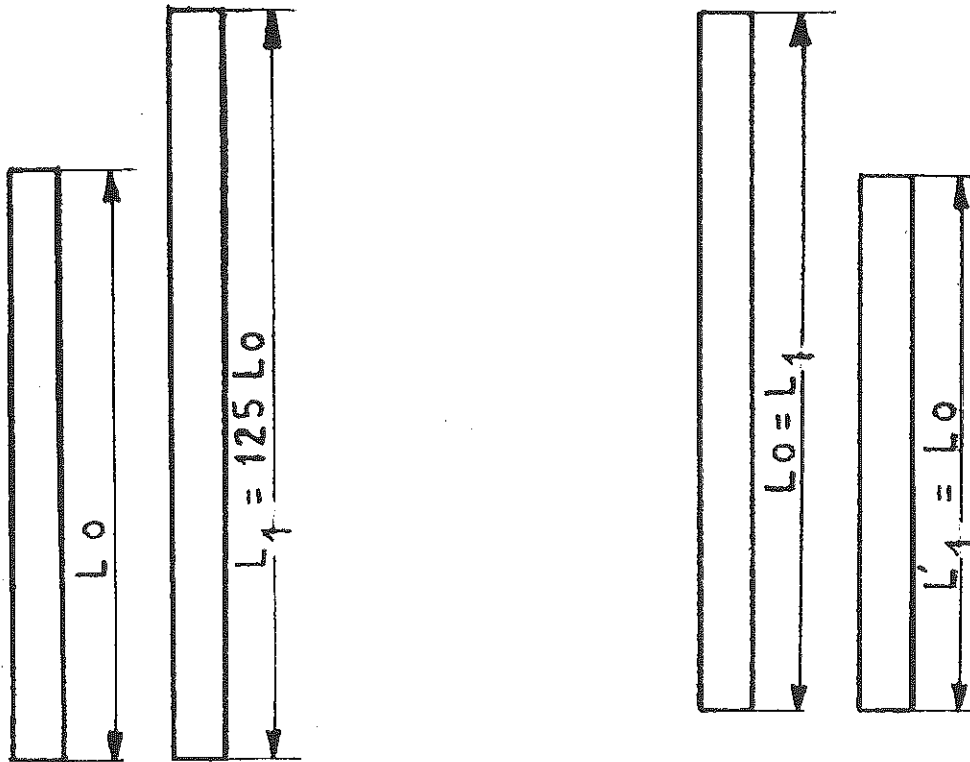


Fig. 98

3. Déformations logarithmiques

Soit à refouler un parallélépipède. Il s'agit nécessairement de *grandes déformations*. La mesure classique des *petites déformations* est

$$\varepsilon_{lin} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Pour les grandes déformations, on écrira de préférence la relation infinitésimale

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l},$$

qui donne

$$\left[\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \right]$$

Comparons ces deux mesures de déformation dans le cas d'un aller-retour :

	logarithmique	linéaire
$l_0 \rightarrow 2l_0$	$\varepsilon = \ln 2$	$\varepsilon_{lin} = \frac{2l_0 - l_0}{l_0} =$
$2l_0 \rightarrow l_0$	$\varepsilon = -\ln 2$ Egales en gdeur	$\varepsilon_{lin} = \frac{l_0 - 2l_0}{2l_0} = -\frac{1}{2}$ diff. en gdeur
$l_0 \rightarrow 0$	$\varepsilon = \ln \frac{0}{l_0} = -\infty$ infinie (normal)	$\varepsilon_{lin} = \frac{0 - l_0}{l_0} = -1$ finie (absurde)

Fig. 99

Calculons à présent le travail de refoulement en admettant un modèle parfaitement plastique : $\sigma = -P/\Omega = -R_e$. On a

$$d\mathcal{J} = P dl = -R_e \Omega dl$$

La déformation plastique étant incompressible, on a

$$\Omega l = \Omega_0 l_0 = V \text{ (volume)}, \quad \Omega = \frac{V}{l}$$

donc
$$d\mathcal{J} = -R_e \frac{V}{l} dl$$

et

$$\mathcal{J}_1^2 = -R_e V \int_{l_2}^{l_1} \frac{dl}{l} = -R_e V \varepsilon \Big|_1^2 = R_e V |\varepsilon \Big|_1^2$$

En particulier, la réduction à néant de la longueur mène à un travail infini, ce qui est normal.

Ce calcul suppose qu'il n'y a pas de frottement sur les plateaux.

4. La figure ci-contre illustre la répartition des fibres que l'on peut obtenir par forgeage.

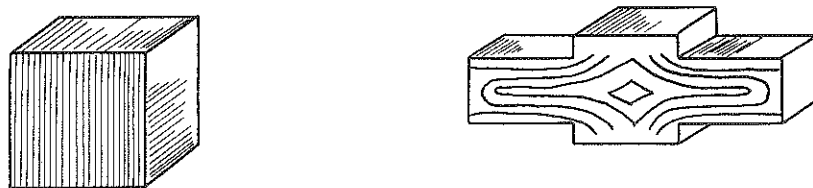


Fig. 100

5. Le forgeage se fait normalement dans le *palier plastique*. Il en résulte que l'acier doux peut être forgé à froid. Les fontes courantes, raides et cassantes, *ne peuvent pas* être forgées.

De nombreux aciers durs n'ont pas de palier plastique. Mais en les chauffant, on peut abaisser leur contrainte plastique et même créer un palier. C'est ce que montre la figure ci-contre pour l'acier 16 Mn Cr 5.

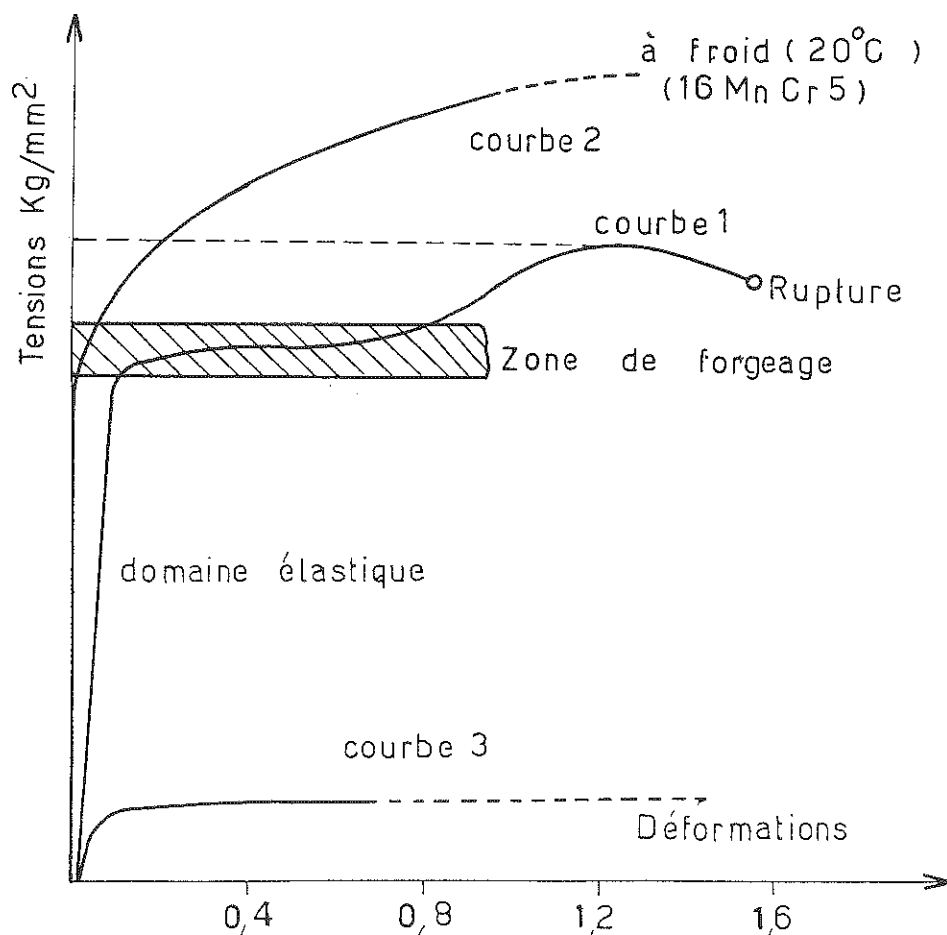


Fig. 101

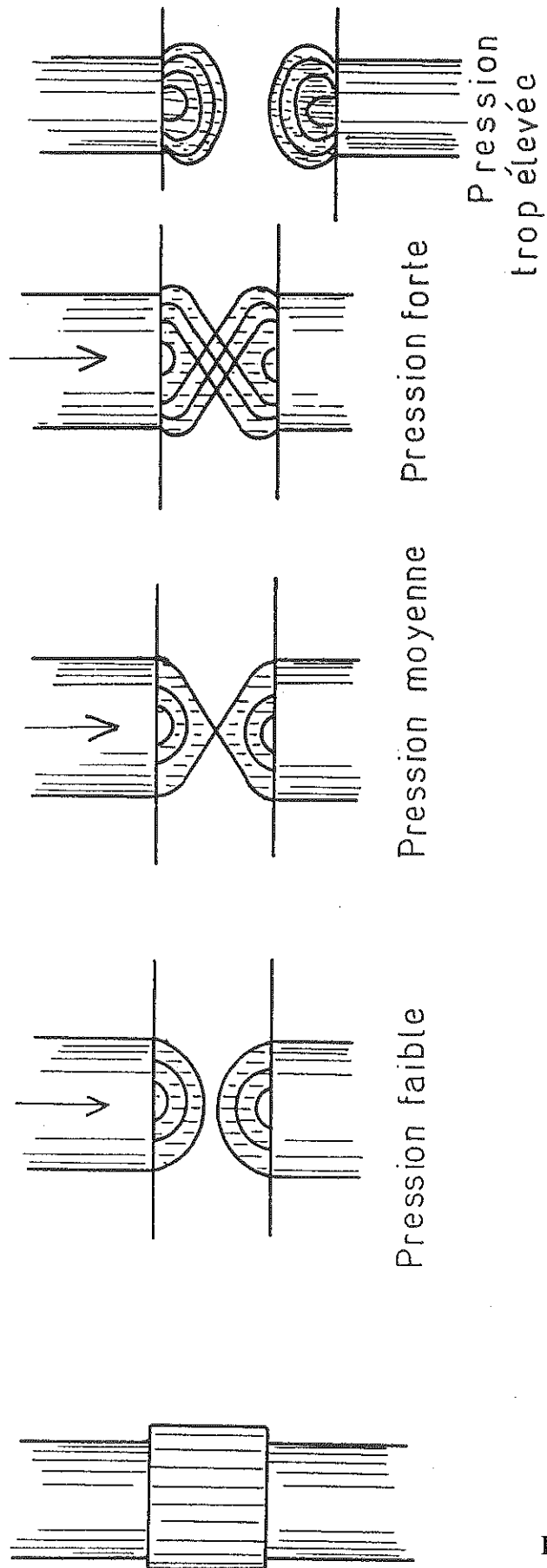


Fig. 102

6. Pénétration de la plasticité

Considérons une pièce soumise à la pression de l'outil sur une partie de sa longueur.

- a) *Si la pression est faible*, la plastification ne se produit qu'à une profondeur réduite. Isolons par la pensée cette zone plastifiée du reste de la pièce. Allongée et écrasée, elle ne s'emboîte plus naturellement dans la partie restante, et on ne peut recoller les morceaux qu'en créant de fortes *contraintes résiduelles*, de compression en surface et de traction à coeur. Ces contraintes rendent la pièce plus résistante en surface mais plus fragile à coeur. On dit, dans ce cas que la pièce *n'est pas forgée à coeur*. Il s'agit d'un défaut à éviter.*
- b) *En augmentant la pression*, on parvient à obtenir une zone plastique s'étendant à travers toute l'épaisseur de la pièce. De cette façon, les parties restées élastiques sont entièrement séparées par la zone plastique et peuvent donc avoir un déplacement d'ensemble tel que les contraintes résiduelles disparaissent. On dit alors que *l'on a forgé à coeur*. C'est ainsi qu'il faut travailler dans les conditions normales.
- c) Cependant, si la pression est très élevée sur une largeur très faible, on risque des ruptures superficielles. On se rapproche alors du *tranchage*.

* Il existe cependant certains cas où des contraintes résiduelles de compression en surface sont *recherchées*, notamment pour améliorer le comportement en fatigue. En particulier, le *galetage*, qui consiste à faire passer un galet sous pression sur la surface, provoque un forgeage superficiel et, par conséquent, ces contraintes résiduelles, pour autant que la pression ne soit pas trop élevée.

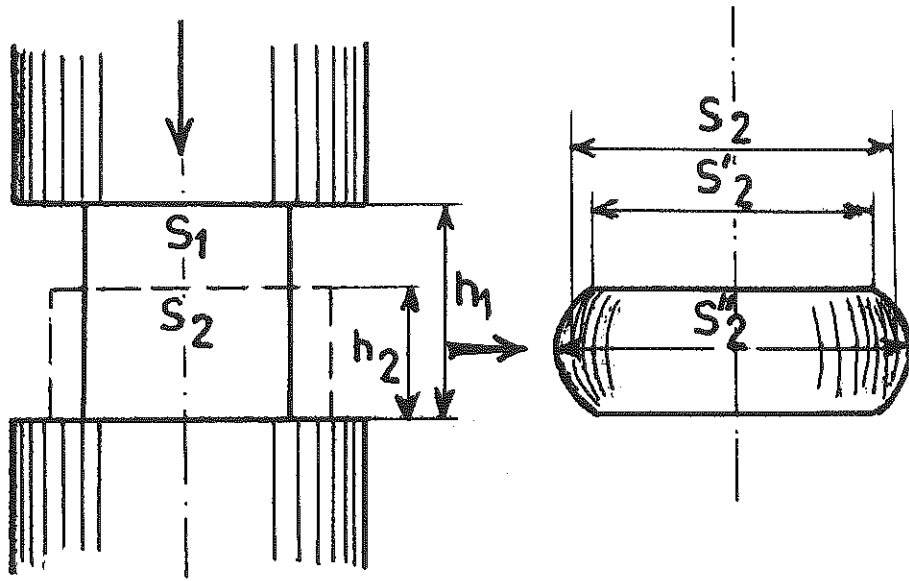


Fig. 103

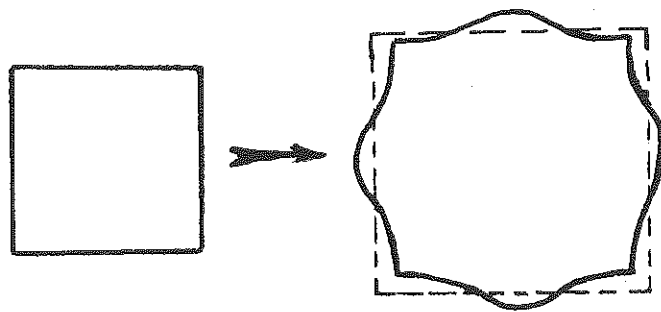
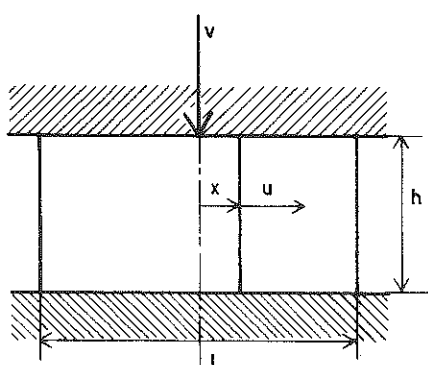


Fig. 104

7. Influence des frottements

Soit à nouveau une pièce pressée entre des plateaux. Le frottement de la pièce sur ceux-ci entrave sa dilatation latérale. Il en résulte une forme de *tonneau* et, de plus, la section est déformée, car le chemin que doivent suivre les angles pour maintenir les formes mènerait à un travail trop grand. La déformation se fait toujours selon un minimum d'énergie.

Les frottements introduisent un *travail supplémentaire*. Pour essayer de chiffrer celui-ci, nous adopterons un modèle énergétique très simplifié, en état plan de déformation.



En négligeant la déformation en tonneau, on a d'abord la relation de conservation du volume entre l'axe et l'abscisse x :

$$\dot{V}'(x) = -vx + uh = 0$$

ce qui donne

$$u = \frac{vx}{h}$$

Fig. 105

Pour évaluer la puissance de frottement, nous admettons qu'il s'agit de *frottement collant*. Ceci demande une explication.

On connaît le frottement coulombien, pour lequel

$$\tau = \mu p,$$

μ étant le coefficient de frottement. Pour des pressions très élevées, τ atteint une valeur τ_0 où il y a déformation plastique locale par cisaillement : c'est le *frottement collant*, où il n'y a plus glissement proprement dit mais déformation sur une faible interface. On a alors $\tau = |\tau_0|$. Cette hypothèse donne, pour l'unité de longueur de la pièce,

$$P_f' = 2 \times 2 \int_0^{l/2} \tau_0 \mu dx = 4\tau_0 \frac{v}{h} \int_0^{l/2} x dx = 4\tau_0 \frac{v}{h} \frac{l^2}{8} = \tau_0 \frac{v}{h} \frac{l^2}{2}$$

Quant à la puissance de déformation, elle vaut

$$P_d' = R_e V' |\varepsilon| = R_e V' \frac{|\dot{h}|}{h} = R_e V' \frac{v}{h} = R_e lv$$

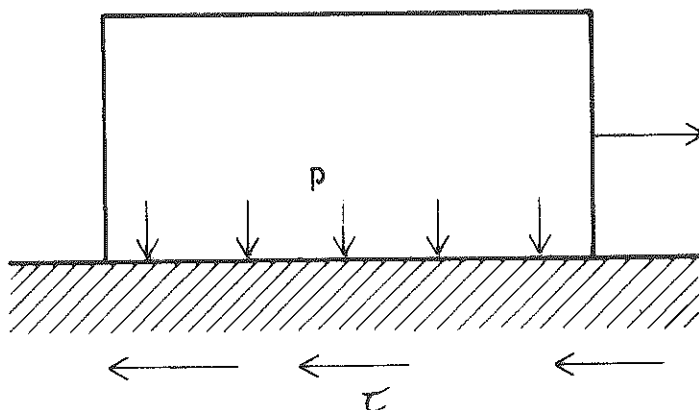


Fig. 106

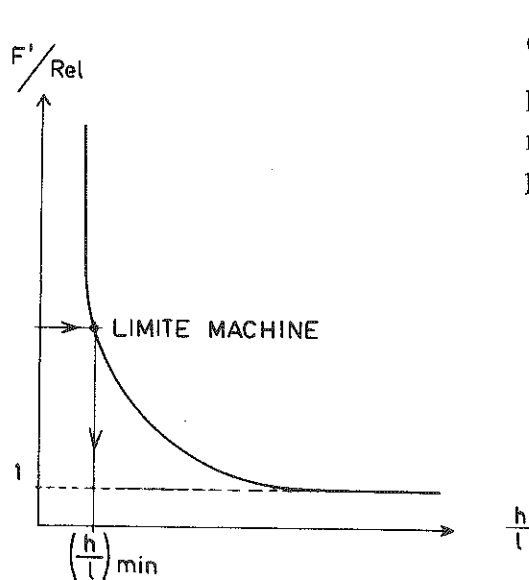
La puissance totale est donc, par unité de longueur,

$$P' = R_e l v + \tau_0 \frac{l^2}{2h} v = R_e l v \left(1 + \frac{\tau_0}{Re} \frac{l}{2h} \right)$$

On en déduit que l'effort nécessaire est, par unité de longueur,

$$F' = R_e l \left(1 + \frac{\tau_0}{Re} \frac{l}{2h} \right)$$

Le premier facteur représente l'effort en l'absence de frottement. Le second est une amplification due à celui-ci.



On constate que pour les très faibles valeurs de $\frac{h}{l}$, l'effort devient très, très grand, et le forgeage n'est même plus possible. Nous rencontrerons ce problème à propos des bavures.

Fig. 107

En pratique, on peut adopter $\frac{\tau_0}{Re} \approx 0,6$, ce qui mène à une pression moyenne de forge

$$p = \frac{F'}{l} = Re \left(1 + 0,3 \frac{l}{h} \right)$$

Voici quelques valeurs indicatives de Re :

$$\text{Aciers mi-durs : } Re \approx \begin{cases} 40 \text{ MPa à } 1100^\circ \text{C} \\ 60 \text{ MPa à } 1000^\circ \text{C} \\ 80 \text{ MPa à } 800^\circ \text{C} \end{cases}$$

(cf. AFNOR-NATHAN 2)

8. Choix de la température de refoulement pour un acier

La contrainte de refoulement décroît avec la température. La température de 850°C, correspondant à un minimum relatif, donne aussi la plus grande ductilité.

Le forgeage au marteau demande des efforts plus importants car *la vitesse de déformation est plus grande* (une augmentation de ε mène à un durcissement).

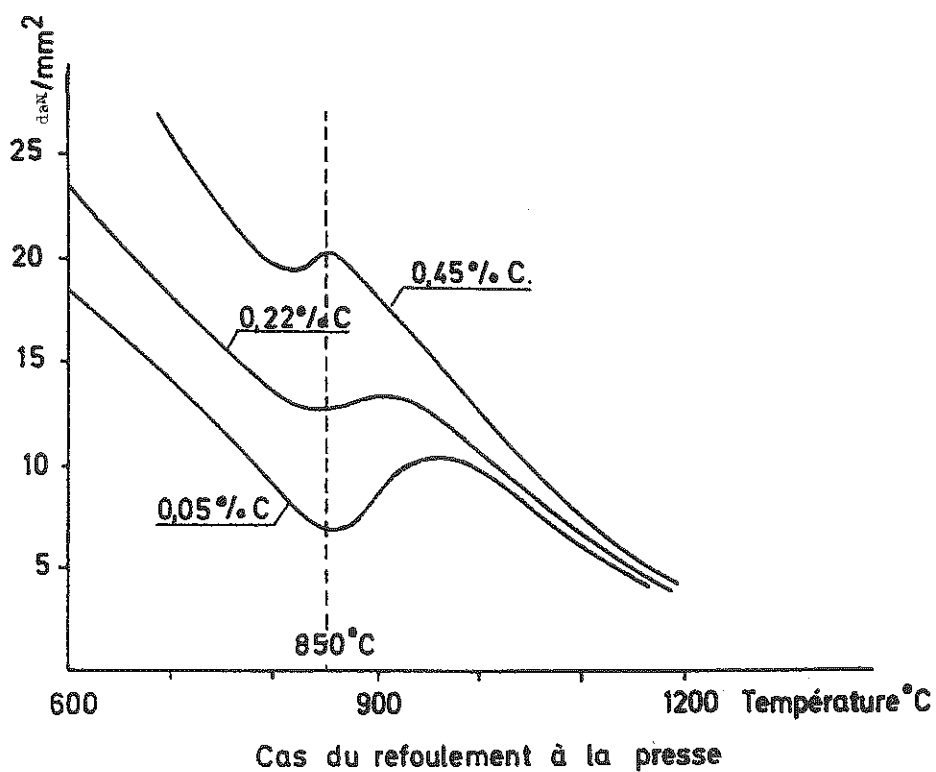


Fig. 108

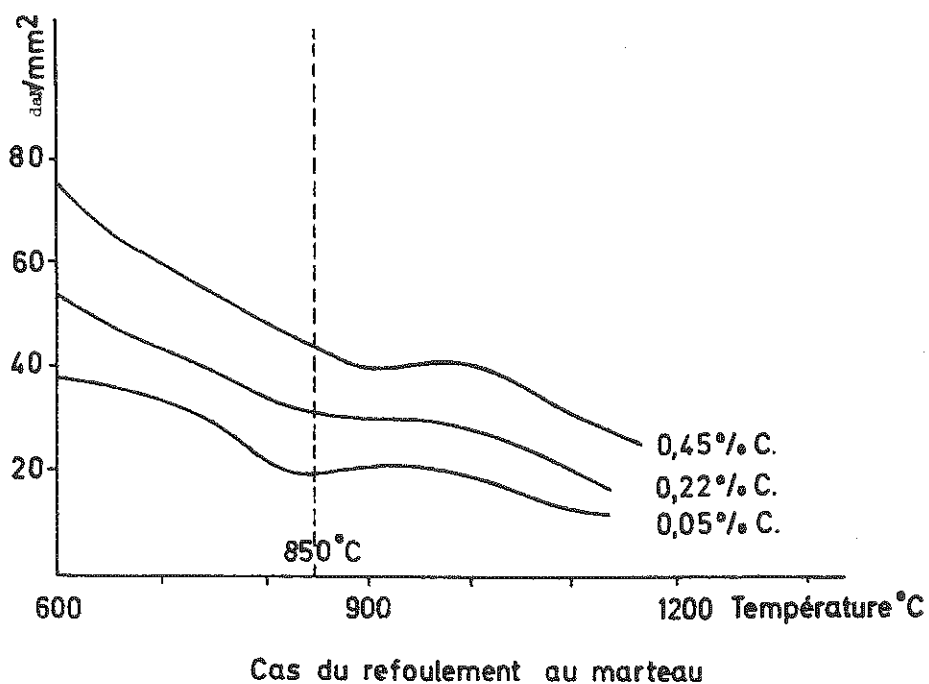


Fig. 109

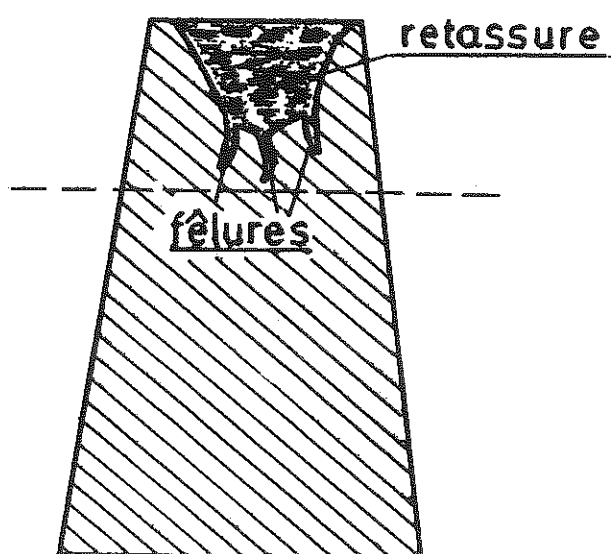
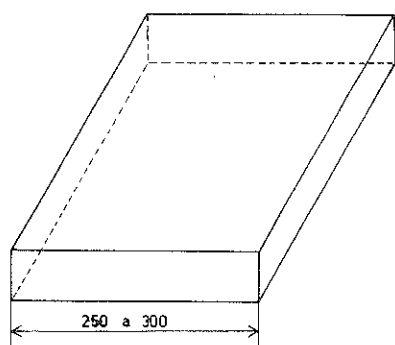


Fig. 110

9. On part généralement de *billettes* ou *barres* à section ronde ou carrée. Dans cet état, le métal a déjà subi un *martèlement intense* destiné à affiner et souder les grains. Rappelons :



lingot → bloom → brame → billette (barre)
 ↓
 bloom allongé
 et aplati
 (rectangulaire)

Fig. 111

Pour les *très grosses pièces*, on part directement du lingot, après en avoir enlevé la partie supérieure contenant des retassures et fêlures (retrait)

Voici quelques ordres de grandeur des efforts à appliquer*

Billettes (rondes ou carrées)

Marteau de

côté ≤ 150 mm

500 kg

200

900

300

1800

450

3000

Lingots (section orthogonale)

550 mm

Marteau 10 000 kg

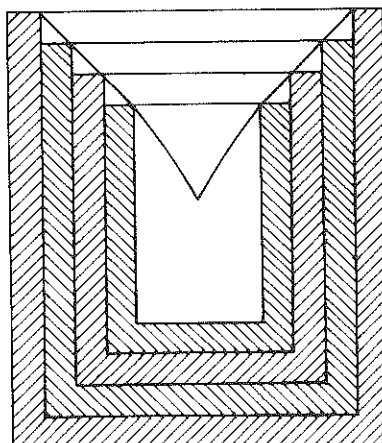
650

presse 150 kN

2200

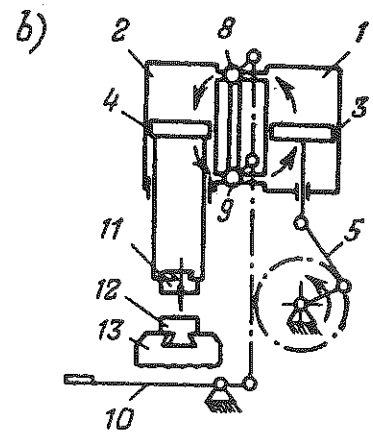
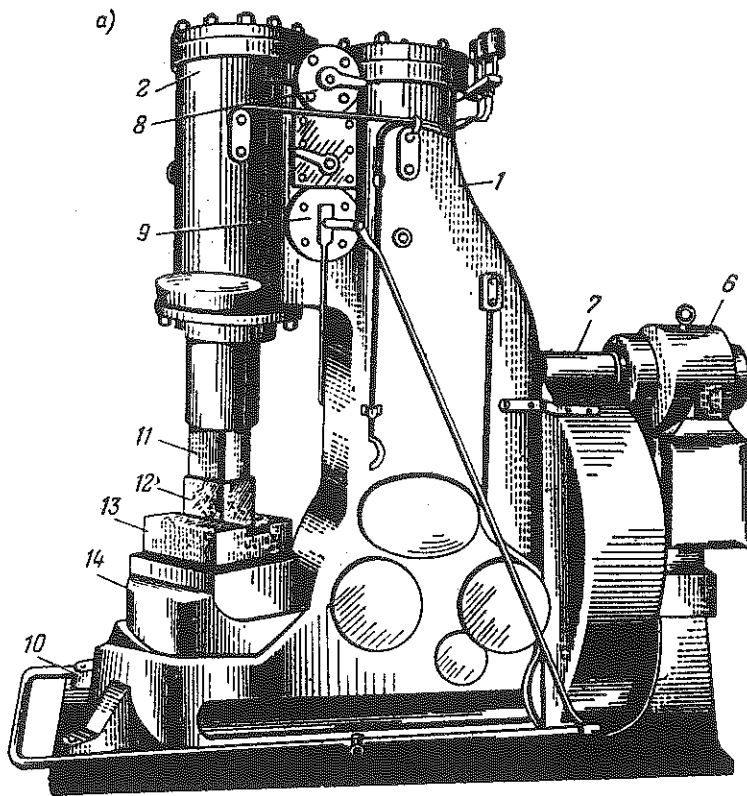
presse 1500 kN

* 1. La solidification conduit toujours à une forme d'entonnoir. Ceci peut s'expliquer comme suit : lorsque la première tranche, la plus proche de la surface, se solidifie, le niveau est au maximum. La solidification de la tranche suivante se produit après refroidissement et contraction du liquide restant : le niveau a donc baissé et ainsi de suite.



2. Les impuretés, plus légères que le métal, surnagent toujours. On les retrouvera donc dans la partie supérieure du lingot.

Fig. 112



Marteau-pilon à
air comprimé
a — vue d'ensemble;
b — schéma cinématique

10. Marteaux et presses

10.1 Marteau-pilon à air comprimé

1. Cylindre de compression
2. Cylindre de travail
3. Piston de compression
4. Piston de travail

Le système bielle-manivelle 5, actionné par le moteur électrique 6, par l'intermédiaire du réducteur 7, transmet au piston de compression un mouvement de va et vient.

Les robinets 8 et 9 dirigent le débit vers le sommet ou le bas du piston de travail. Ils sont commandés par la pédale 10.

11. Frappe supérieure
 12. Frappe inférieure
 13. Coussin
 14. *Chabotte* : n'est pas liée au bâti du marteau.
- } assemblage par queue d'aronde amovible

La *masse du marteau* est de 50 kg à 1 t. La *masse de la chabotte* est de 15 à 20 fois la masse tombante.

Il existe des marteaux-pilons à *vapeur* et à *air*.

10.2. Marteau-pilon à double montant

Ces marteaux-pilons peuvent être à vapeur ou à air. Ils existent à simple ou double effet (cas le plus fréquent à l'heure actuelle).

La vapeur ou l'air comprimé est refoulé(e) dans le cylindre de travail par le tiroir 1 commandé par l'opérateur, au moyen du levier 2. La frappe supérieure 3 est fixée sur le coulisseau 4. Le coulisseau est rattaché à l'extrémité inférieure de la tige 5. L'extrémité supérieure de la tige 5 est fixée au piston 6 du cylindre de travail.

L'enclume fixe 7 est montée sur le bloc inférieur d'acier 8, lui-même attaché à la chabotte 9. Cette dernière est indépendante du bâti.

La masse tombante peut aller de 0,5 à 5 t.

La pression de vapeur est de 6 à 8 bar.

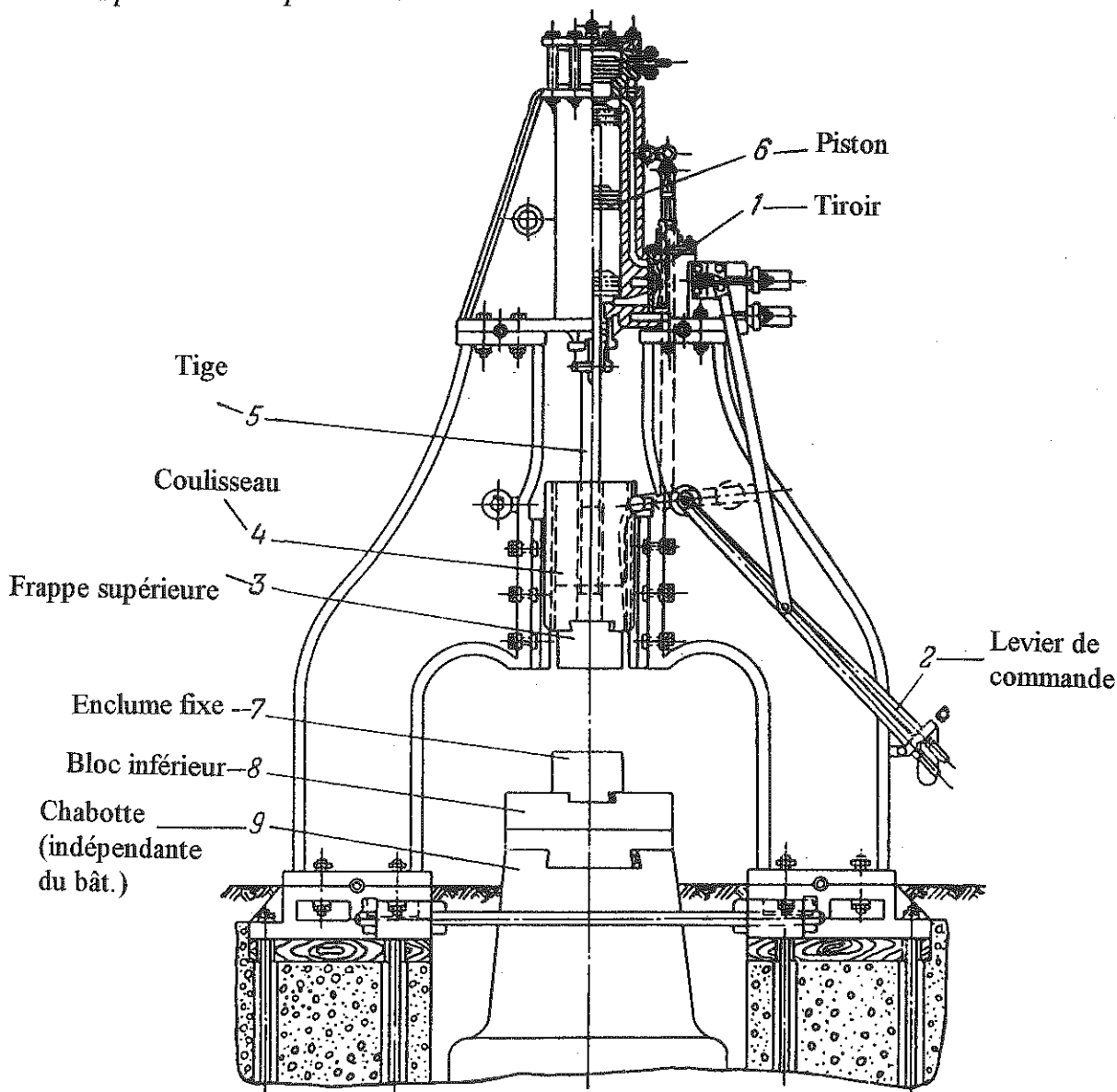


Fig. 114

Schéma d'un marteau-pilon à double montant

10.3. Efficacité théorique d'un marteau-pilon

10.3.1.

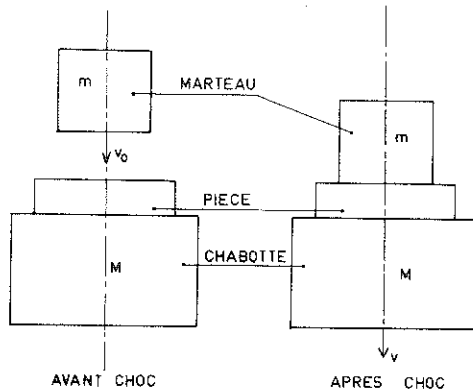


Fig. 115

soit

$$v = \frac{m}{M+m} v_0$$

L'énergie cinétique avant choc vaut

$$T_0 = \frac{1}{2} m v_0^2$$

Après choc, elle vaut

$$T = \frac{1}{2} (M+m) v^2 = \frac{1}{2} \frac{m^2}{M+m} v_0^2$$

La différence entre ces deux énergies sert à déformer la pièce, qui reçoit donc un travail

$$\mathcal{J} = T_0 - T = \frac{1}{2} \left[m - \frac{m^2}{M+m} \right] v_0^2 = \frac{M}{M+m} \cdot \frac{1}{2} m v_0^2$$

Le rapport

$$\eta = \frac{\mathcal{J}}{T_0} = \frac{M}{M+m}$$

mesure donc l'efficacité du marteau-pilon. En effet, l'énergie cinétique T_0 a dû être provoquée et constitue donc une dépense. De cette énergie, seule la fraction ηT_0 est utilisable pour déformer la pièce. En fonction du rapport M/m , on a encore

$$\eta = \frac{M/m}{1 + \frac{M}{m}}$$

Juste avant le choc, le marteau a une vitesse v_0 . Dans le cas idéal d'un choc parfaitement mou, la chabotte et le marteau ont après choc une vitesse commune v .

La conservation de la quantité de mouvement implique

$$m v_0 = (M+m) v,$$

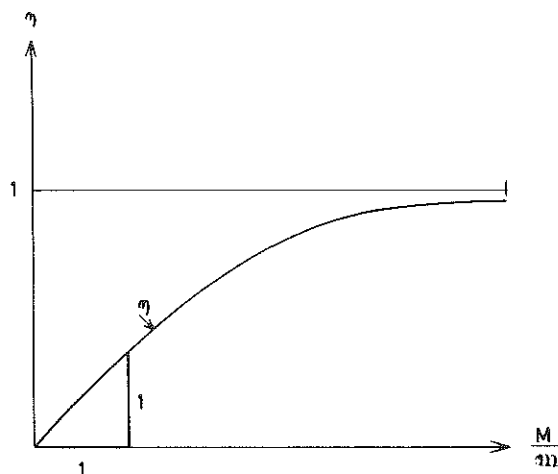


Fig.116

On constate que l'efficacité du marteau-pilon est d'autant plus grande que la chabotte est plus lourde. C'est pour la même raison que le forgeron des temps jadis travaillait sur une enclume beaucoup plus lourde que son marteau.

M/m	η
0	0
1	0,5
2	0,6667
5	0,8333
10	0,9091
20	0,9524
50	0,9804
100	0,9901

Fig. 117

10.3.2. En réalité, cependant, le choc n'est pas parfaitement mou, et il faut encore tenir compte d'une certaine restitution. Le mouvement du système (marteau + chabotte) peut se décomposer en :

- mouvement du centre de gravité (indice G)
- mouvement relatif à ce centre de gravité (indice r)

On démontre aisément que l'énergie cinétique se décompose en

$$T = T_G + T_r.$$

Or, l'énergie cinétique du mouvement du centre de gravité ne peut pas varier, en vertu de la conservation de la quantité de mouvement : on a donc

$$T_G = T_{G0}.$$

Par contre, l'énergie cinétique relative T_r peut diminuer. On appelle *coefficient de restitution de Newton* le rapport

$$\varepsilon^2 = \frac{T_r}{T_{ro}}$$

Pour $\varepsilon = 1$, le choc est parfaitement conservatif; pour $\varepsilon = 0$, il est parfaitement mou. Toutes les valeurs intermédiaires sont possibles. Le travail servant à forger la pièce est alors

$$\mathcal{J} = T_r - T_{ro} = (1 - \varepsilon^2) T_{ro}.$$

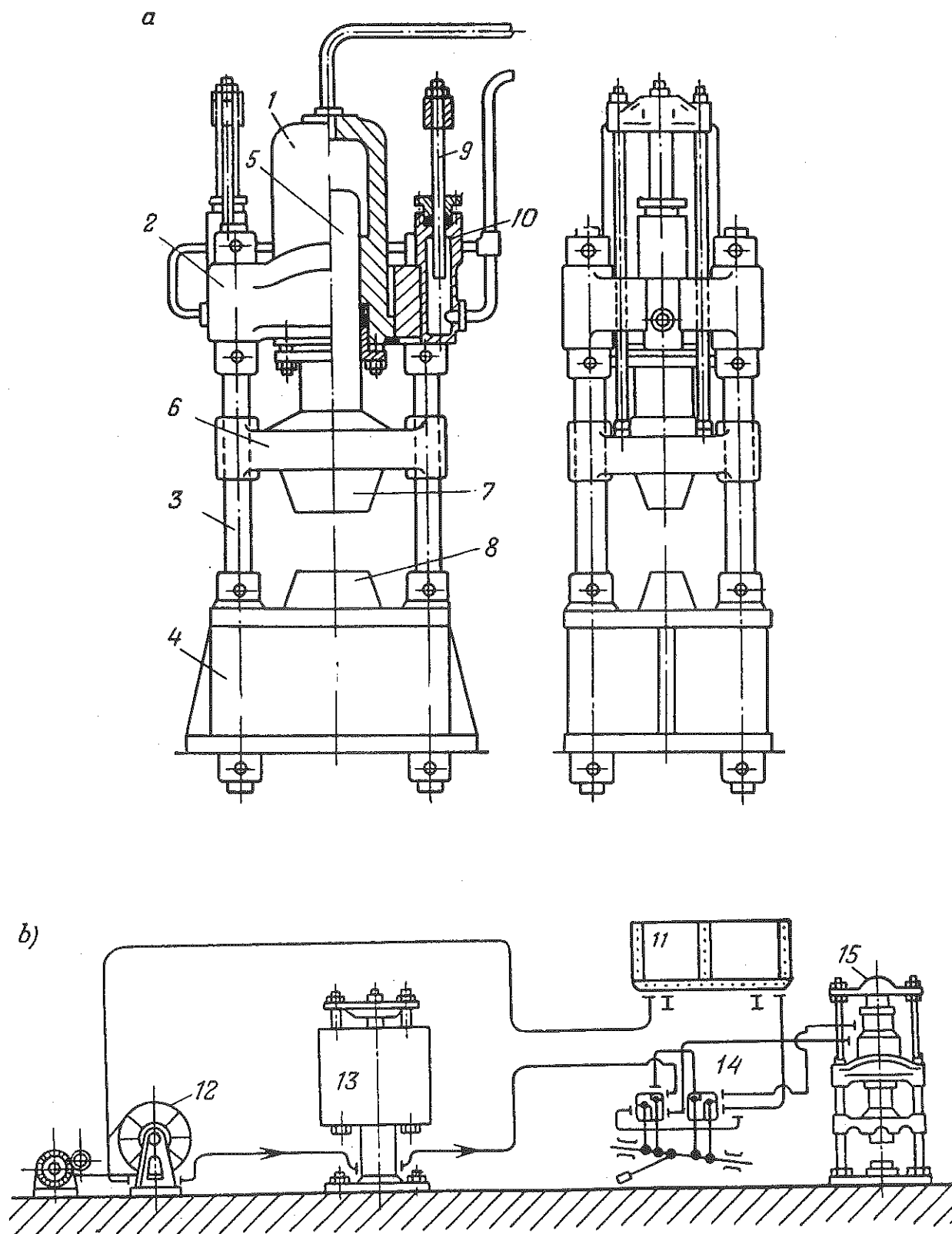
Or, nous avons fait le calcul pour $\varepsilon = 0$, ce qui donnait

$$\mathcal{J}_{\varepsilon=0} = T_{ro} = \eta T_o.$$

On peut donc affirmer que pour $\varepsilon \neq 0$, le travail récupérable sera

$$\mathcal{J} = (1 - \varepsilon^2) \eta T_o.$$

Il est raisonnable de poser $\varepsilon \approx 0,3$: les pertes par rebondissement s'élèvent alors à 9 %.



Presse hydraulique

a — schéma de l'organisation; *b* — schéma de l'installation

Fig. 118

10.4. Presse hydraulique

Le piston de travail 1 est lié à la traverse supérieure 2, elle-même rattachée par les colonnes 3 à la traverse fixe inférieure 4 placée sur une fondation. Un plongeur mobile 5 accouplé à la traverse mobile 6 se déplace à l'intérieur du cylindre de travail.

7 : frappe supérieure

8 : enclume

Pour le *relevage*, le liquide agit sur le plongeur 9 des *cylindres de relevage* 10.

Le liquide de travail peut être de l'eau, une émulsion, ou de l'huile. La pression est de l'ordre de 300 bar.

Détail du circuit hydraulique :

11. Réservoir de fluide

12. Pompe

13. Accumulateur : permet d'utiliser des pompes dont le débit est inférieur au débit de marche. La masse 13 maintient la pression (principe de gazomètre)

14. Distributeur

15. Presse

Les efforts vont de 300 à 1500 tonnes

11. Retreint

11.1. Rétreindre une pièce, c'est amincir sa section

En frappant, on obtient, à partir d'une longueur L et une largeur B , une longueur

$$L_1 = L + a_1 + a_2 \approx L + 2a$$

et une largeur

$$B_1 = B + e_1 + e_2 \approx B + 2e.$$

En frappant à côté, on allongera à $L_2 = L + 4a$, mais la largeur restera $B + 2e$. On peut donc allonger la pièce autant que l'on veut. On donne des coups *jointifs* pour assurer la continuité.

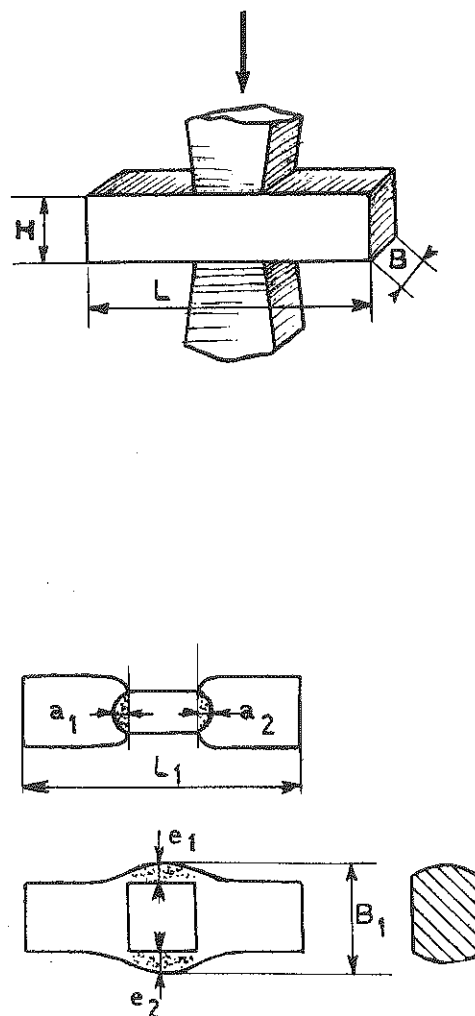
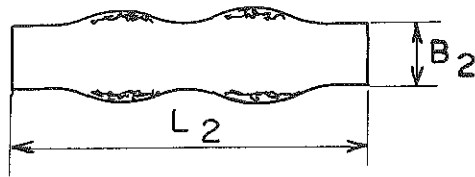


Fig. 119



(coups jointifs)

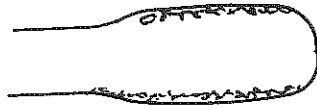


Fig. 120

11.2. Pour amincir dans les deux directions perpendiculaires à une axe donné, on tourne la barre à 90° autour de cet axe après chaque coup.

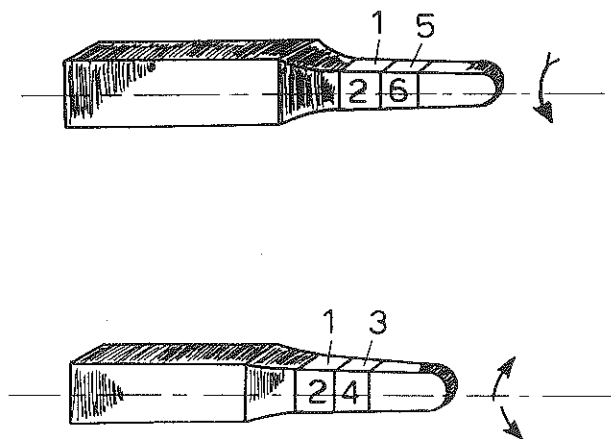


Fig. 121

11.3. Si la pièce est trop élancée, elle va *flamber*. L'expérience montre que tout danger de flambage est évité si la hauteur est limitée par la condition

$$h \leq 3,5 a$$

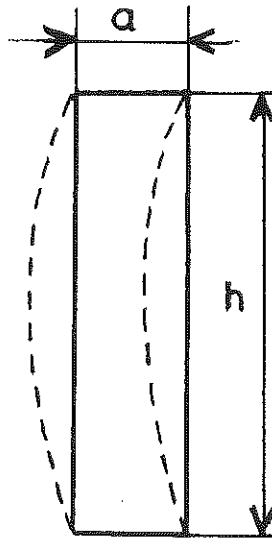
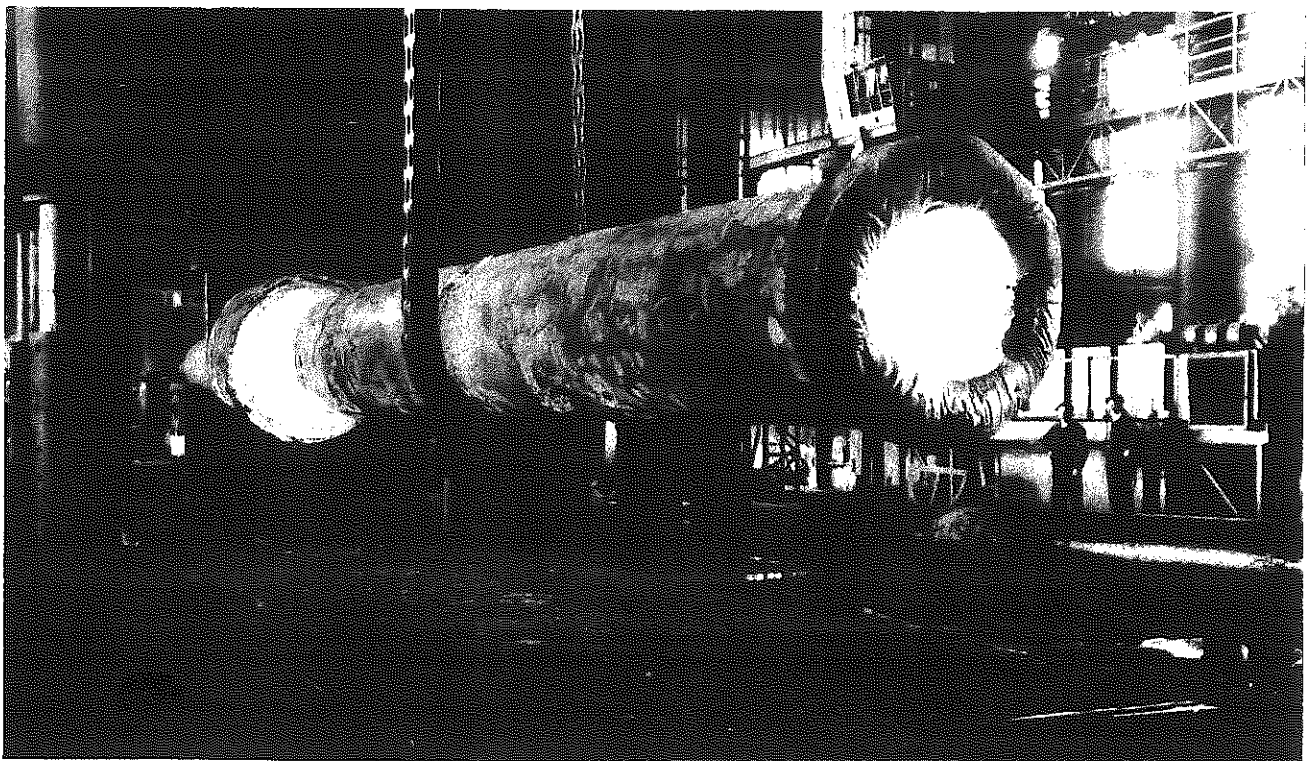


Fig. 122

11.4. La figure ci-contre illustre un processus de forgeage très lourd. On notera la taille des ouvriers. Il s'agit ici de travail à la presse.



Forgeage d'un tube de synthèse pour une usine chimique par une presse de 6 000 tonnes.

Fig. 123

11.5. Outillage de rétreint

Le rétreint se fait entre plats d'enclume et de marteau.

- Pour le *dégrossissage*, on place la pièce perpendiculairement au marteau, de manière à obtenir une bonne pression et forger à coeur.
- Pour la *finition*, on place la pièce parallèlement au marteau, ce qui permet d'égaliser.

Pour le dégrossissage, on emploie aussi des marteaux *convexes* qui donnent de plus fortes pénétrations. Mais si les pièces sont *trop minces*, ces marteaux entraînent la formation de *criques*. Ce problème se pose en particulier en fin d'opération.

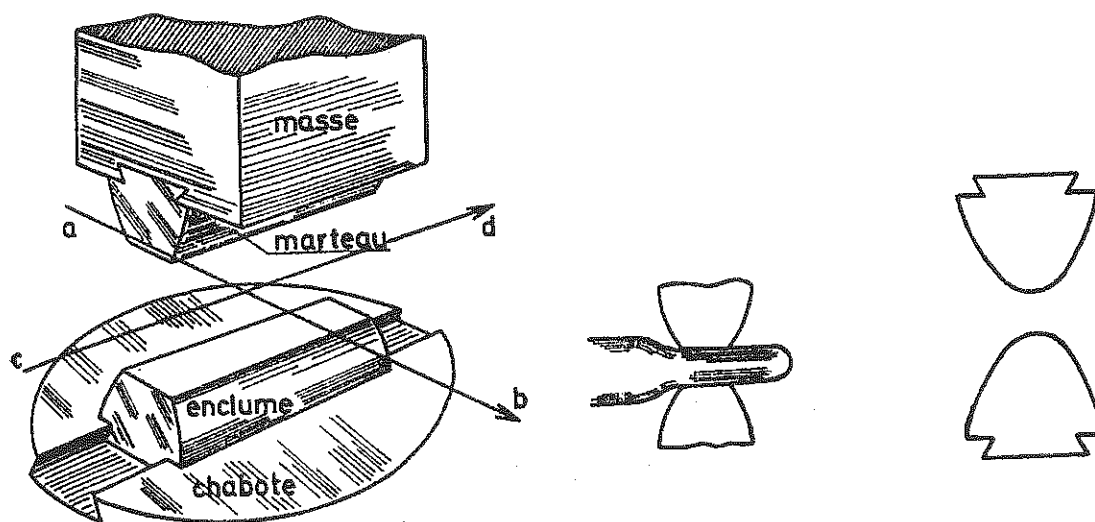


Fig. 124

Pour éviter ce danger, on utilise des marteaux possédant les deux formes, la forme ronde étant moins saillante que l'autre. Cette disposition fixe un seuil en-deçà duquel il n'est plus possible de forger qu'à plat. L'inconvénient de ce type de marteaux est le *risque*, entre des mains inexpérimentées, de *se heurter à grande vitesse sur leurs plats*.

Une meilleure finition des barres *rondes* peut être obtenue à l'aide d'*étampes cylindriques*.

De même, les pièces *polygonales* peuvent être finies à l'aide d'une *étampe en V*.

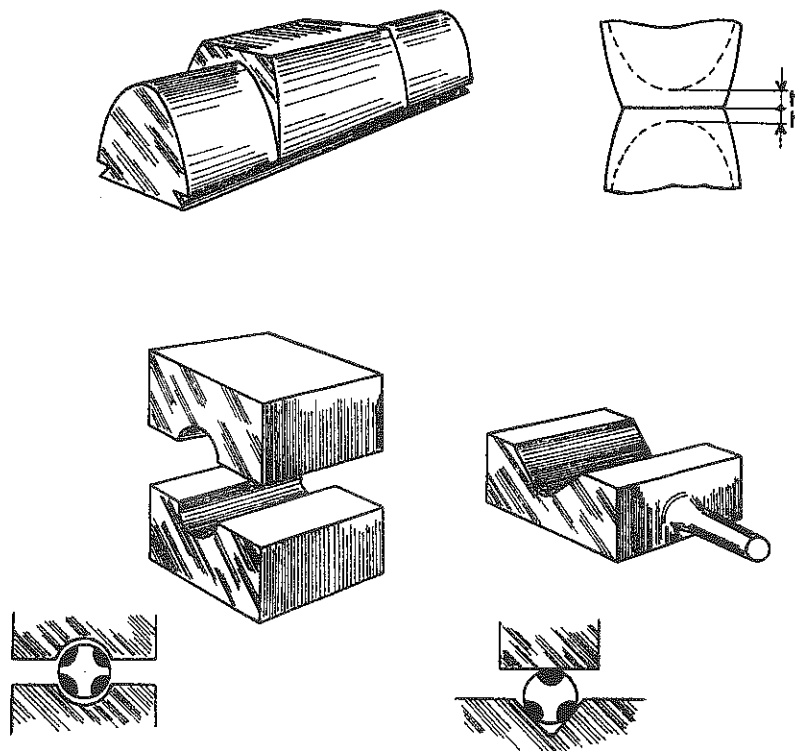


Fig. 125

Là qualité d'un forgeage se décèle facilement à l'aspect de l'extrémité de la barre forgée : la présence d'un cône rentrant indique que la matière centrale n'a pas flué (fig.

a), tandis qu'une barre forgée à coeur présente une extrémité arrondie (fig. b).



Fig. 126

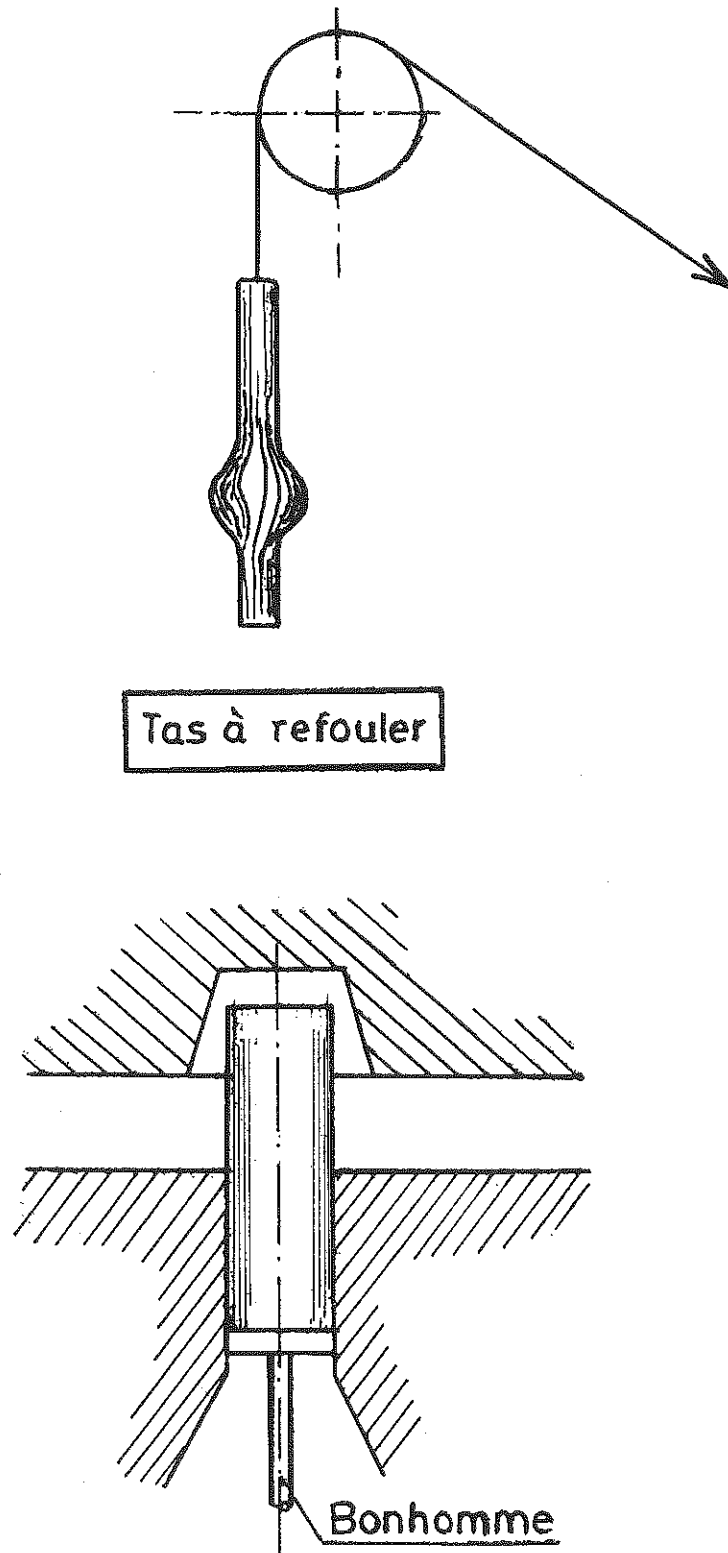
Refouler.

Fig. 127

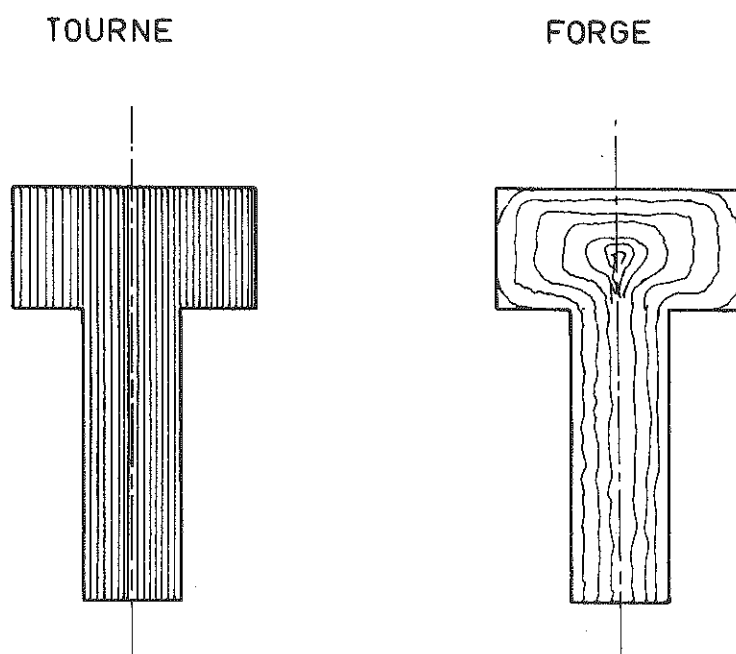
12. Refoulage

Refouler, c'est créer un renflement de la section en un endroit déterminé d'une barre.

12.1. Méthode traditionnelle

- On dispose sur le sol un gros bloc métallique appelé *tas à refouler*.
- La barre à refouler est suspendue verticalement par un câble
- Les parties à renfler sont seules chaudes
- On lâche la barre, qui est refoulée sous l'effet du choc. Ce procédé s'adapte mal à la mécanisation. Actuellement, on préfère rétreindre une barre large, ce qui se fait sans peine au pilon.

12.2. Il existe cependant une exception notable, à savoir, le *refoulage des têtes de boulons ou de rivets*. Dans ce cas, le forgeage conduit à l'évidence à une bien meilleure répartition des fibres que le tournage. A cela, il faut ajouter que le tournage implique une importante perte de matière sous forme de copeaux.



Le processus se déroule comme suit : la tige est disposée dans un alésage et s'appuie sur un piston de butée appelé *bonhomme*. Le coup est donné par un poinçon reproduisant en creux la forme de la tête.

Fig. 128

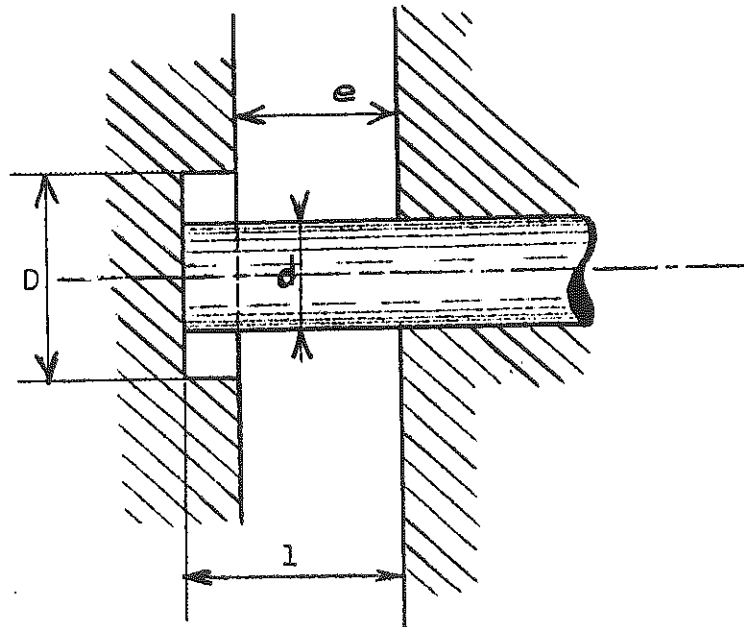


Fig. 129

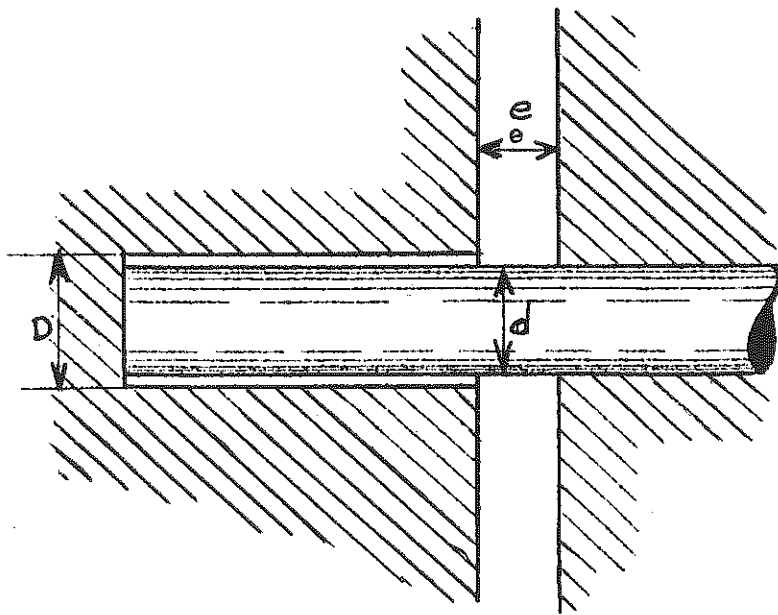


Fig. 130

12.3. Les règles de E.R. FROST

La difficulté essentielle du procédé est le *risque de flambage*. Après de nombreuses expériences, E.R. FROST a dégagé les règles suivantes.

- 1) Il n'y a pas de danger de flambage si $l \leq 3d$
- 2) Dans le cas contraire ($l > 3d$), il y aura flambage. Mais celui-ci sera sans conséquence si sont réunies les conditions suivantes :

$$D \leq 1,5 d \text{ et } e \leq d.$$

En effet, dans ce cas, la tige sera guidée lors de son flambement, ce qui l'empêchera de faire des *plis* qui ne se ressoudent pas.

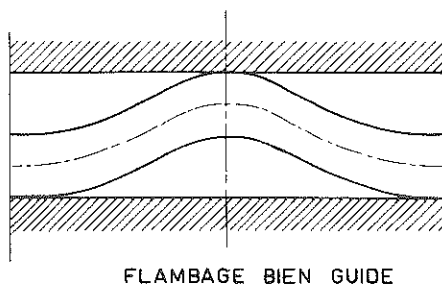


Fig. 131

flambage bien guidé

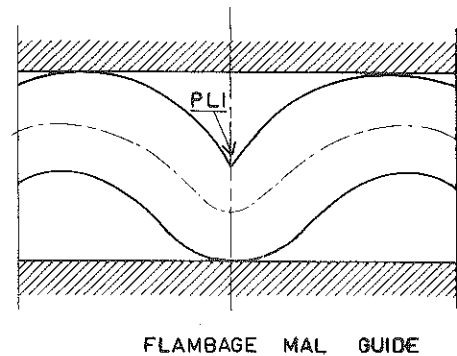


Fig. 132

flambage mal guidé

Comment établir une gamme de fabrication respectant ces conditions ? Soit une tête de diamètre maximum D et de hauteur h . On peut généralement écrire son volume sous la forme

$$V = kD^2h$$

Le volume s'obtient à partir d'une tige de diamètre d et de longueur l , dont le volume doit être égal :

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 l$$

La condition 1) limite ce volume par la condition

$$V \leq \frac{\pi}{4} d^3$$

soit

$$\frac{4V}{\pi d^3} \leq 3 \quad (1')$$

Si cette condition est remplie, on peut travailler en une passe.

Dans le cas contraire, on commencera par forger une tête circulaire de même volume pour laquelle D et h sont choisis de manière à satisfaire à la condition (2). Le volume étant

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h = \frac{\pi}{4} d^2 l,$$

on a

$$\frac{l}{h} = \left(\frac{D}{d}\right)^2,$$

ce qui implique

$$\frac{e'}{l} = \frac{l-h}{l} = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

comme

$$\frac{1}{l} = \frac{\pi d^2}{4V},$$

on a

$$\frac{e}{l} = \frac{e\pi d^2}{4V} = 1 - \frac{d^2}{D^2}$$

soit

$$\frac{e}{d} \frac{\pi d^3}{4V} = 1 - \frac{d^2}{D^2}$$

ou encore

$$\frac{e}{d} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot \frac{4V}{\pi d^3}$$

On vérifiera donc la condition $\frac{e}{d} \leq 1$ si

$$\left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot \frac{4V}{\pi d^3} \leq 1$$

ce qui donne successivement

$$1 - \frac{d^2}{D^2} \leq \frac{\pi d^3}{4V}$$

$$\frac{d^2}{D^2} \geq 1 - \frac{\pi d^3}{4V}$$

et

$$\frac{D^2}{d^2} \leq \frac{1}{1 - \frac{\pi d^3}{4V}}$$

ou encore

$$\frac{D}{d} \leq \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\pi d^3}{4V}}} \quad (2')$$

Le second membre de cette inégalité est une fonction décroissante de $\frac{4V}{\pi d^3}$. Pour $\frac{4V}{\pi d^3} = 3$, on obtient

$$\frac{D}{d} \leq \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,225 < 1,5.$$

La seconde partie de la condition (2) est donc vérifiée. Si cette valeur n'est pas suffisante, on procède *en plusieurs passes*, en se limitant à la valeur (2').

Exemple : $h = d$, $D = 1,9 d$, tête circulaire

$$\frac{4V}{\pi d^3} = \frac{\pi \cdot (1,9)^2 \cdot d^3}{\pi d^3} = 3,610$$

Il faut donc faire plusieurs passes.

$$1^{\text{ère}} \text{ passe} : \frac{D}{d} = \sqrt{\frac{3,610}{3,610 - 1}} = 1,176$$

$$D_1 = 1,176 d$$

$$h_1 = \frac{4V}{\pi D^3} = 2,610 d$$

2^e passe : $d_2 = 1,176 d$ $\frac{4V}{\pi d^3} = 2,220$: vérifie la condition (1).

13. Perçage

13.1. Perçage des pièces épaisses : on utilise un *mandrin de perçage*. On chauffe le bloc à percer et

- 1) On enfonce le mandrin jusqu'à mi-épaisseur
- 2) On retourne la pièce et on enfonce à nouveau le mandrin jusqu'à mi-épaisseur
- 3) On retourne à nouveau la pièce et on cisaille le noyau restant par un dernier coup de mandrin.

Si l'on veut *calibrer* le trou, on y enfonce un *tonneau à calibrer*.

Attention : ce procédé ne peut être utilisé que si le diamètre D du mandrin vérifie

$$D \leq H/2,$$

où H est l'épaisseur de la pièce. Dans le cas contraire, le noyau ne sera pas cisailé mais simplement refoulé.

13.2. Perçage des pièces minces : Si $D > H/2$, on place la pièce sur une bague dont le diamètre intérieur est celui du trou à réaliser et on frappe avec un *perçoir en dépouille*.

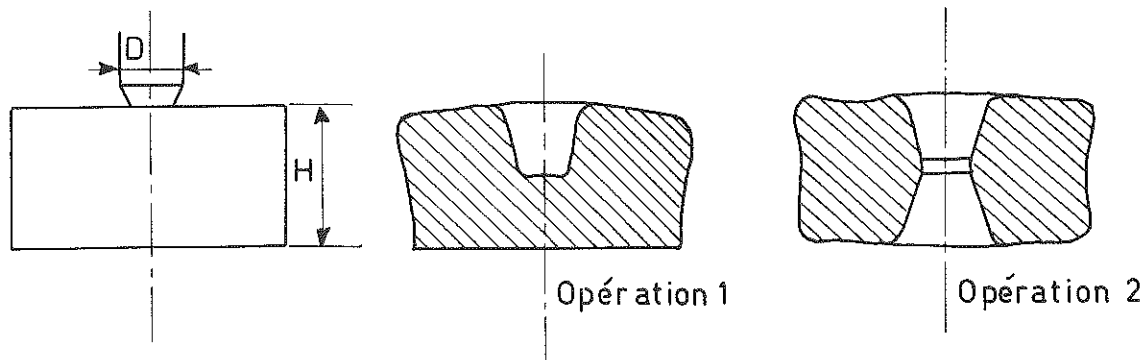


Fig. 133

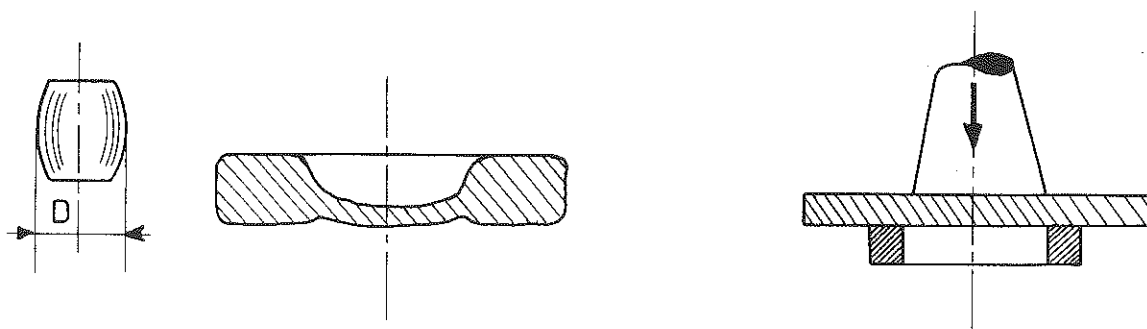


Fig. 134

14. Bigornage

A partir d'une pièce percée, on peut obtenir un anneau mince par *bigornage*. Ce procédé consiste à frapper la pièce posée sur un cylindre, en la faisant tourner entre deux coups (fig. 136).

Ce procédé nécessite un opérateur expérimenté. Aussi, chaque fois que le diamètre intérieur du trou le permet, on tend à le remplacer par un *laminage circulaire* (figs. 135 et 137), consistant à faire tourner l'anneau entre deux cylindres. Comme application de ce procédé, citons entre autres les bandages de roues de chemin de fer.

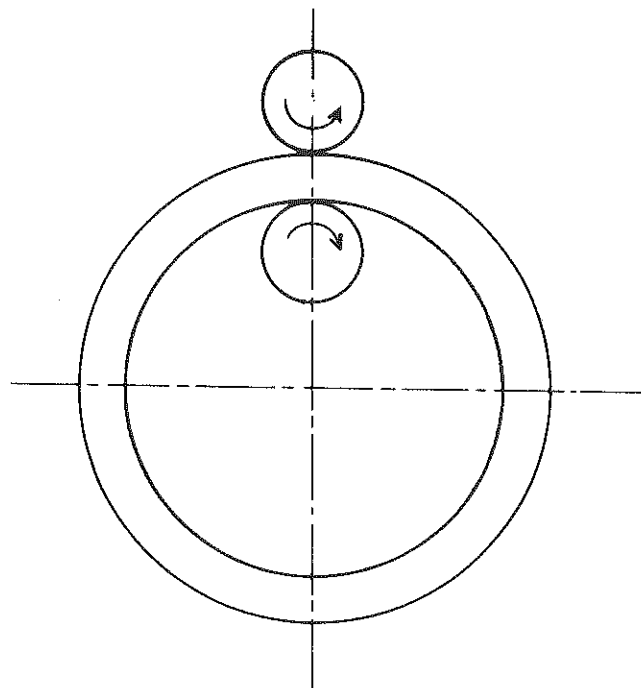


Fig. 135

BIGORNAGE

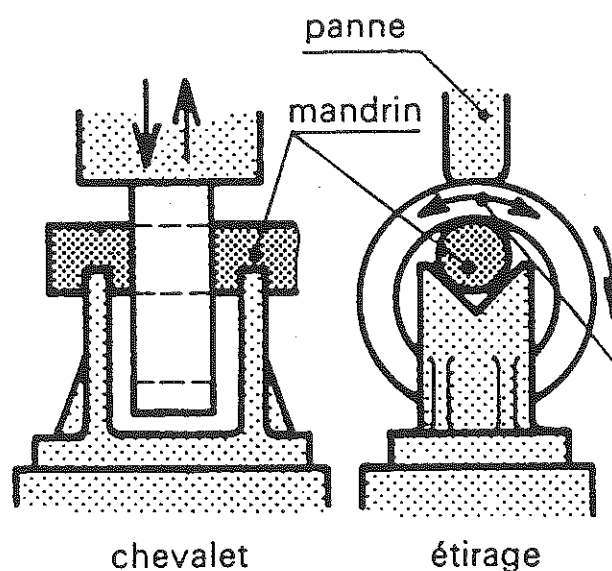


Fig. 136

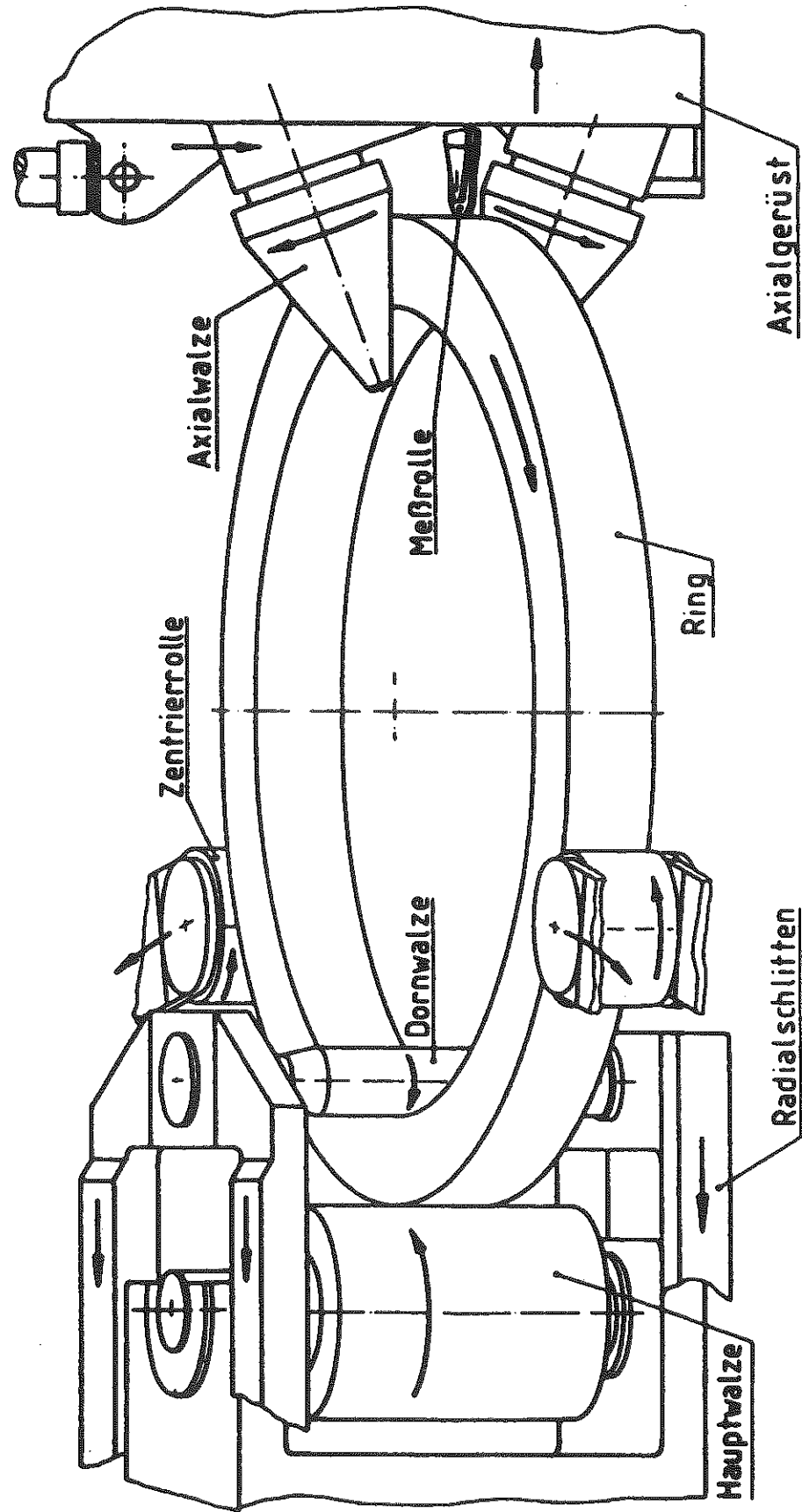


Fig. 137

15. Tranchage

En *maréchalerie*, on procédait comme suit. La *tranche* inférieure était placée sur l'enclume. La tranche supérieure était tenue par l'aide du maréchal ferrant. On frappait alors sur la tranche supérieure.

A la *machine*, on place la pièce sur l'enclume, et on travaille avec *une seule tranche* en deux fois, avec retournement. De toute manière, les lèvres sont *en biseau* et la coupure est *déportée*, car un des deux côtés a moins de matière et donc moins de résistance au refoulement.

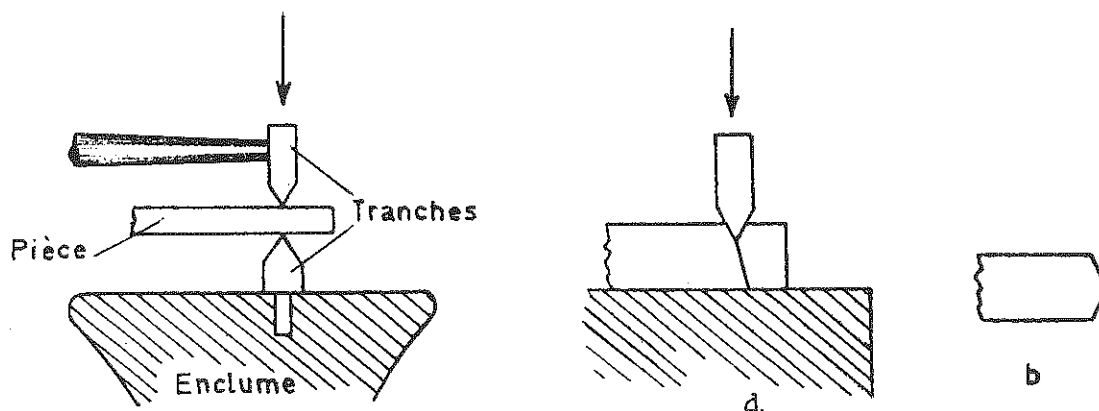


Fig. 138

16. Déportage ou dégorgage

Pour faire un *épaulement* brusque, il faut d'abord entailler la pièce, puis rétreindre. En l'absence d'entaille, on obtiendrait un gros congé.

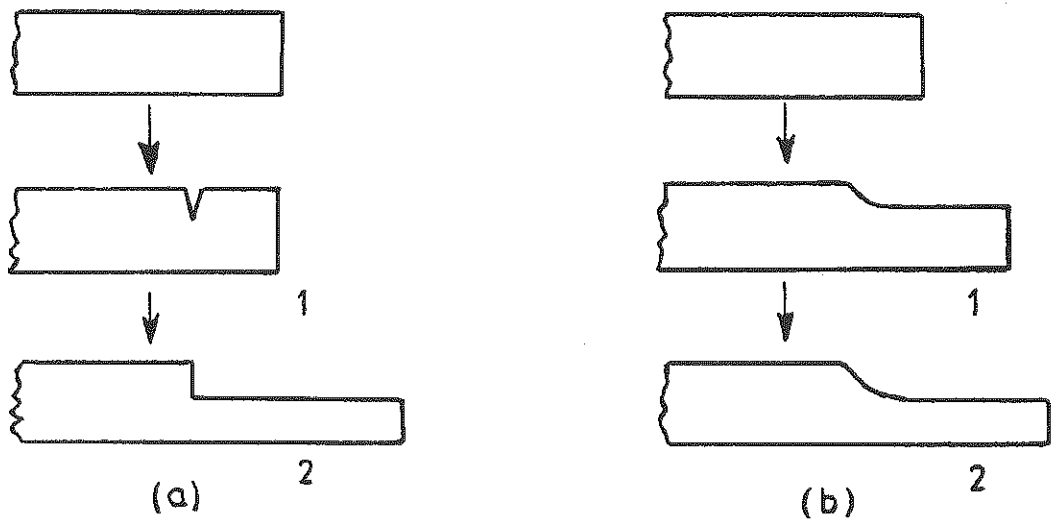


Fig. 139

17. Pliage

17.1. La méthode la plus simple de plier une pièce consiste à la placer chauffée entre deux broches. Mais ce procédé ne permet de maîtriser ni la courbure, ni la position du pli.

17.2. On peut *localiser le pli* en plaçant la pièce dans un *étau de forge*.

17.3. Le pliage produit des déformations de la section, dites *déformations anticlastiques*, qui sont dues à l'effet de Poisson.

Plier.

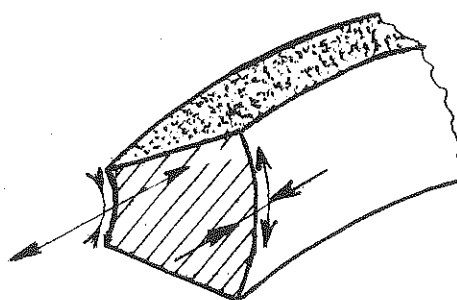
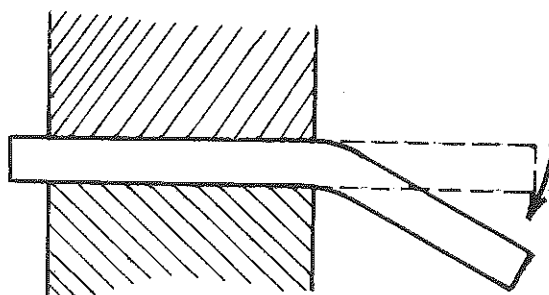
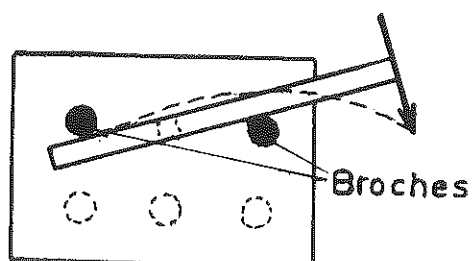


Fig. 140

17.4. On peut aussi plier dans une *étampe*. Le poinçon peut être lui-même à la forme du pli.

17.5. Ce procédé permet de réaliser des *manivelles*. Mais attention ! Le frottement empêchera une bonne pénétration dans l'étampe. Il faut donc procéder en *deux étapes*. La première servira à amener suffisamment de matière au droit du maneton lors de la mise à forme définitive.

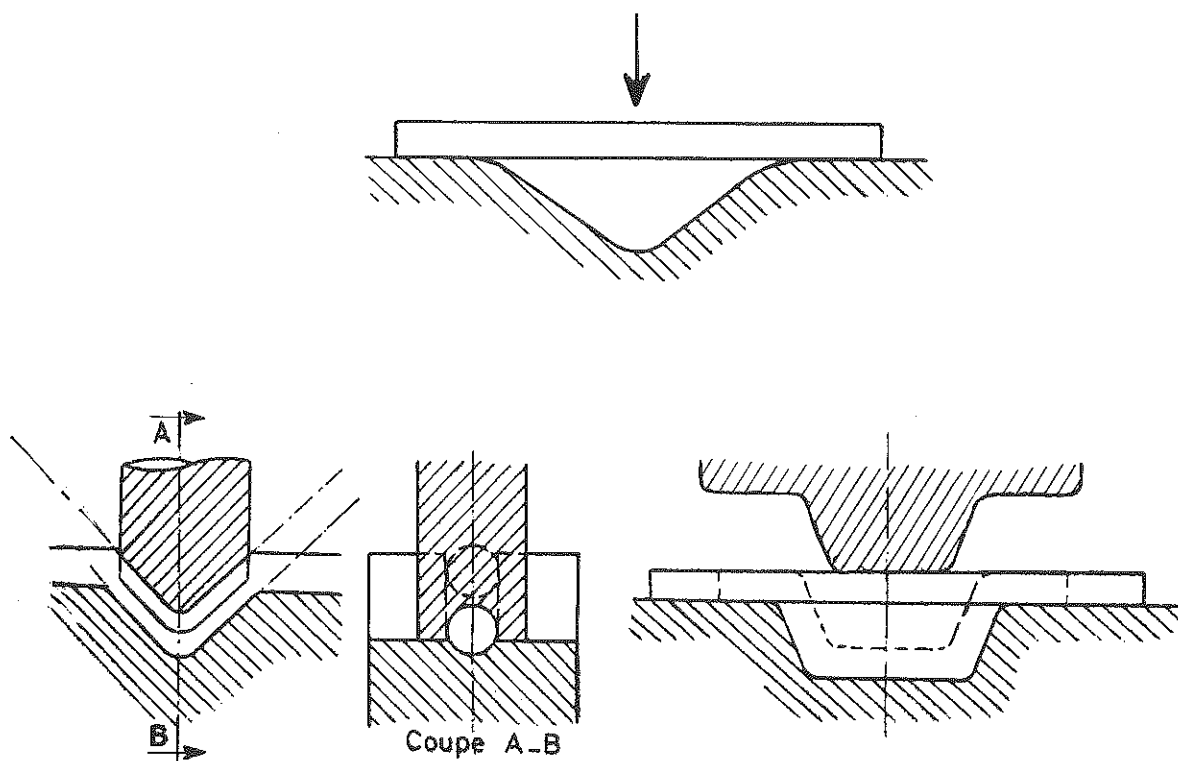


Fig. 141

Tordre.

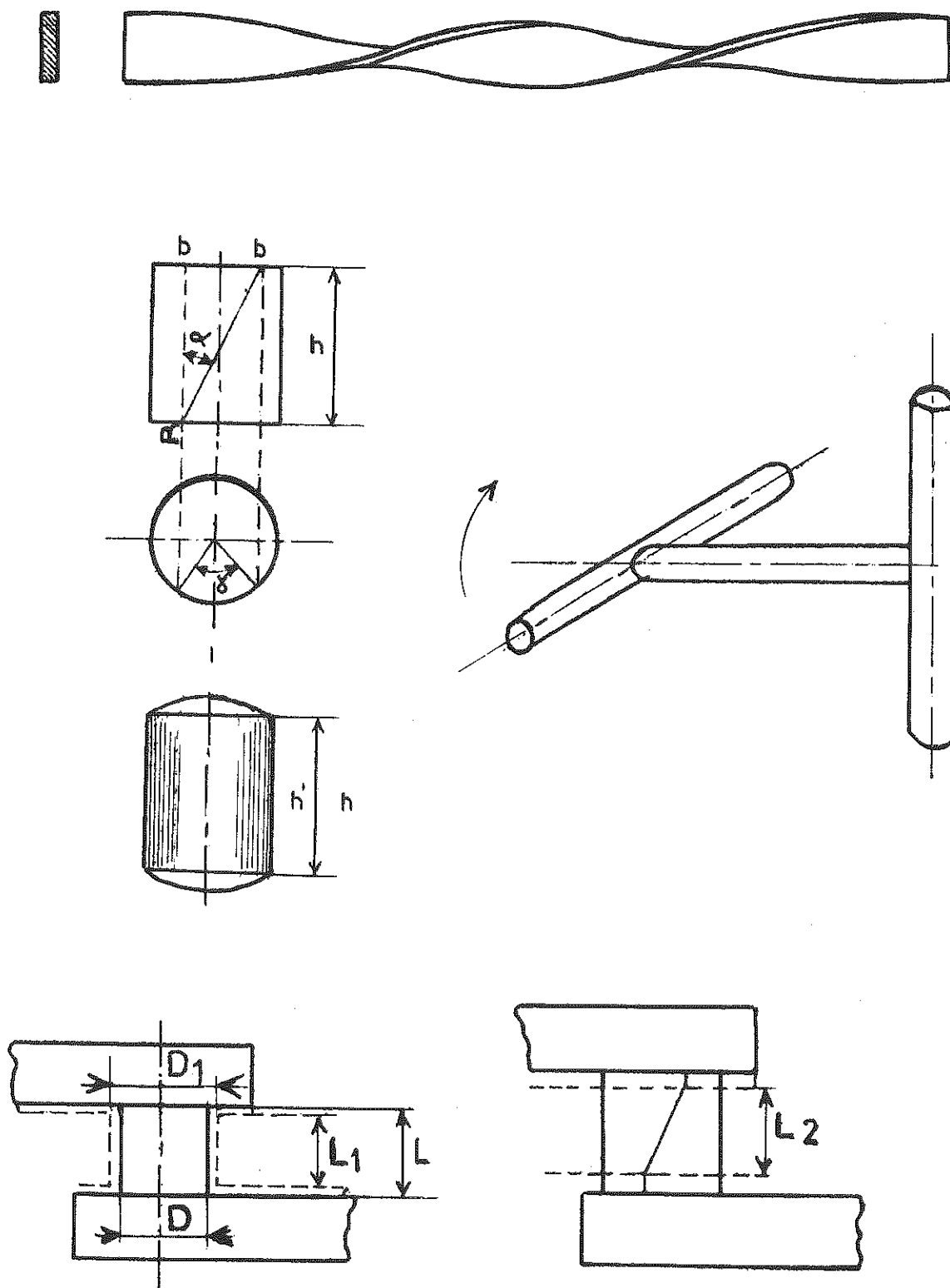


Fig. 142

18. Torsion

18.1. Tordre une pièce *allongée* ne pose pas de problème.

18.2. Pour les pièces *courtes*, il faut se rendre compte que lors de la torsion, une fibre de longueur l prend une longueur

$$l' = \sqrt{l^2 + \theta^2 r^2} \approx l \left(1 + \frac{1}{2} \theta^2 \frac{r^2}{l^2} \right),$$

ce qui correspond à un allongement proportionnel $\varepsilon \approx \frac{1}{2} \frac{\theta^2 r^2}{l^2}$.

Si la pièce était composée de cylindres minces indépendants, il y aurait donc, par relaxation, un raccourcissement

$$\Delta l(r) = \frac{1}{2} \frac{\theta^2 r^2}{l}$$

réparti par moitié aux deux extrémités. Le déplacement de l'extrémité supérieure serait donc

$$w(r) = -\frac{1}{4} \frac{\theta^2 r^2}{l}.$$

En réalité, ce raccourcissement est partiellement empêché par les contraintes de cisaillement τ_{rz} .

Un modèle simple consiste à poser $w(r, z) = Kz \frac{r^2}{2}$,

ce qui donne

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = K \frac{r^2}{2}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial w}{\partial r} = Krz, \quad K \text{ à déterminer.}$$

Les contraintes de bridage sont $\sigma_o = \frac{1}{2} E \theta^2 \frac{r^2}{l^2}$.

L'énergie élastique vaut alors

$$\int_{-l/2}^{l/2} dz \int_0^R \left(\frac{1}{2} EK^2 \frac{r^4}{4} + \frac{1}{2} GK^2 r^2 z^2 + \frac{1}{2} E \theta^2 \frac{r^2}{l^2} K \frac{r^2}{2} \right) r dr = \frac{1}{2} EK^2 l \frac{R^6}{24} + \frac{1}{2} GK^2 \frac{R^4 l^3}{48} + EK \theta^2 \frac{R^6}{24l}$$

Elle est minimale pour

$$EKI \frac{R^6}{24} + GKI^3 \frac{R^4}{48} + \frac{E\theta^2 R^6}{24I} = 0$$

soit $K = - \frac{\theta^2}{I^2 \left(1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2} \right)}$,

ce qui donne

$$w(r, z) = - \frac{\theta^2 r^2 z}{2I^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}}$$

$$w\left(r, \frac{l}{2}\right) = - \frac{\theta^2 r^2}{4I} \cdot \frac{1}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}}$$

On notera que $\frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\theta^2 r^2}{2I^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}}$,

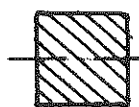
ce qui conduit à des contraintes résiduelles d'extension

$$\begin{aligned} \sigma_{rés} &= \sigma_0 - E \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{2} E \theta^2 \frac{r^2}{I^2} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} E \theta^2 \frac{r^2}{I^2} \left(\frac{\frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}} \right) \\ &= \frac{1}{4} E \theta^2 \frac{r^2}{R^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}} \end{aligned}$$

dont le maximum est $\frac{1}{4} \frac{E\theta^2}{1 + \frac{G}{2E} \frac{I^2}{R^2}}$.

18.3. Le problème des tensions résiduelles est particulièrement aigu dans le cas des vilebrequins gauches.

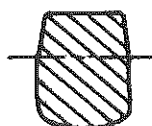
ESTAMPER



a Barre droite



b Barre pliée

c Coup sur la tranche
(de la matière se fixe
dans la concavité)d Redressage
(on a créé une surépaisseur)

(a)

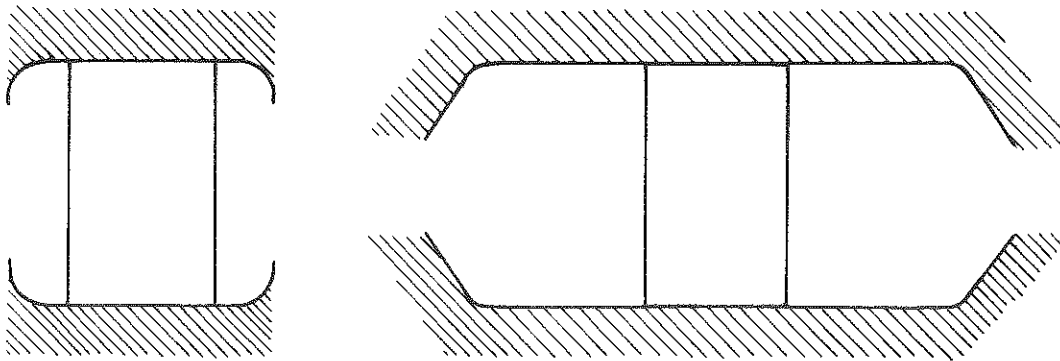


(b)

19. Estampage

19.1. L'estampage est le forgeage en matrice. Il ne s'applique qu'aux *grandes séries*, car la fabrication des estampes est coûteuse. On estampe d'habitude entre 700 et 1000°C. Il est donc nécessaire, dans le dessin des matrices, de tenir compte du retrait après forgeage.

19.2. Il faut *préparer* les pièces en plaçant d'abord la matière au bon endroit. Si la forme finale est allongée, on ne peut partir d'un bloc carré, car il se dilatera aussi bien en largeur qu'en longueur, créant ainsi des bavures. Or, les bavures, de faible épaisseur, réduite, ne peuvent plus être forgées. La pièce doit donc d'abord être mise sous une forme allongée.



Divers procédés peuvent être utilisés pour modifier correctement la forme générale de l'ébauche. On en trouvera deux ci-contre.

19.3. La bielle ci-contre est une bonne illustration. On commence par faire un *diagramme des sections*. Ces sections sont alors un peu augmentées pour compenser les bavures. On produit un corps ayant les sections voulues à l'aide d'un *laminoir d'ébauche*.

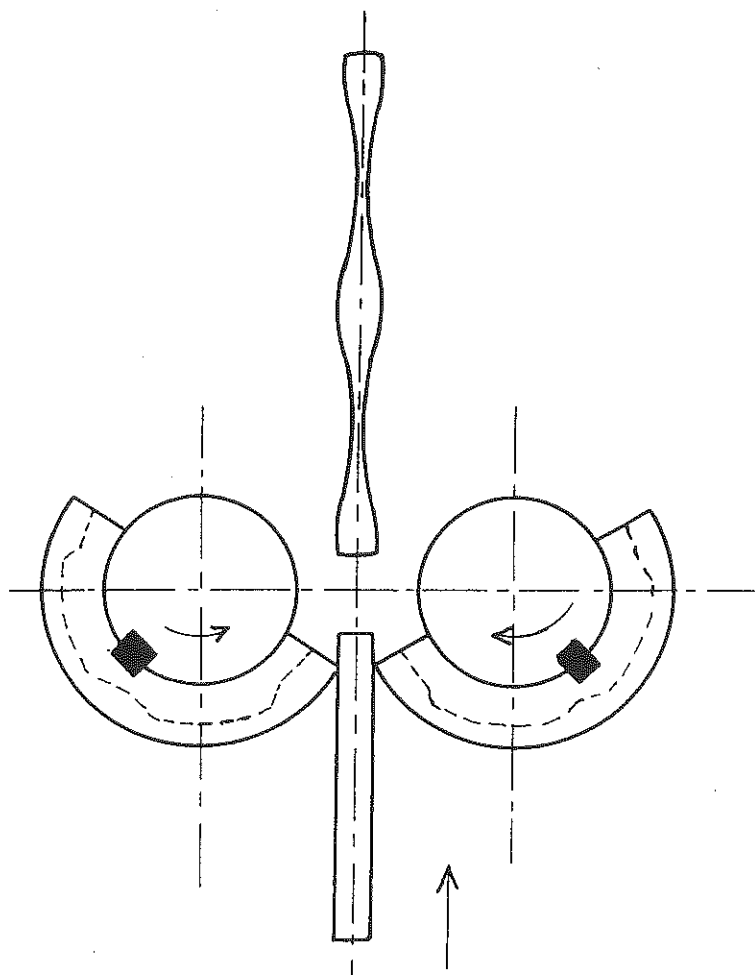
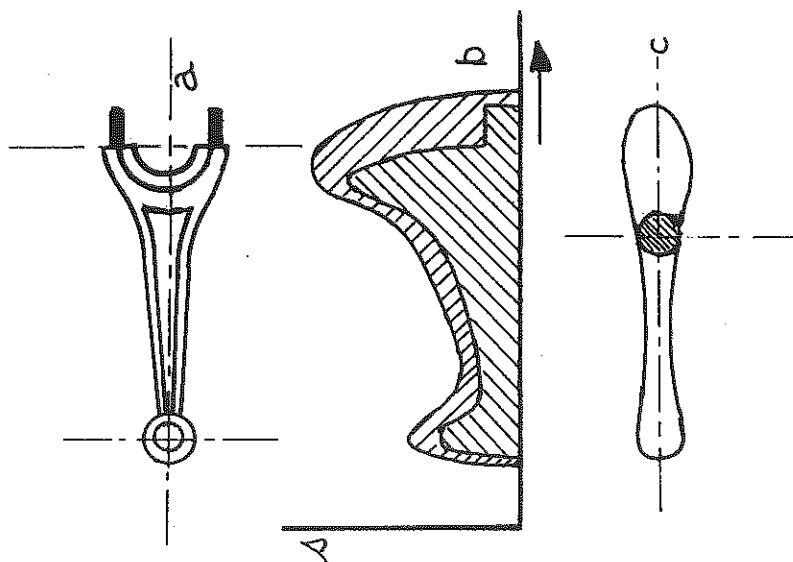


Fig. 145

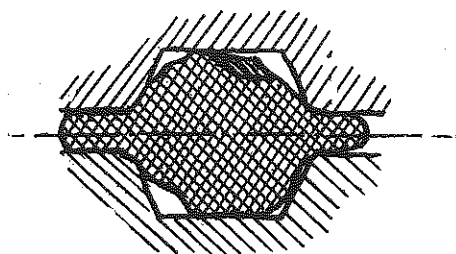
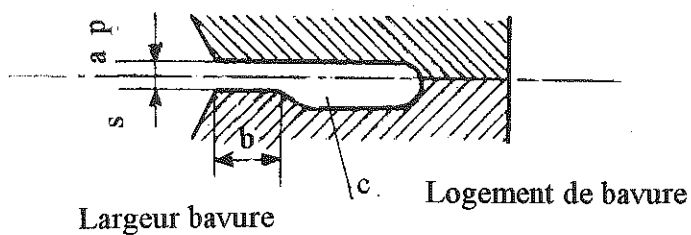


Fig. 146

Tableau : Dimensions de la bavure

S mm ²	s mm	b/s		
		Refouler	Aplatir	Remonte r
≤ 1.800	0,6	8	10	13
1.800-4.500	1	7	8	10
4.500-11.200	1,5	5	5,5	7
11.200-28.000	2,5	4	4,5	5,5
28.000-71.000	4	3	3,5	4
71.000-180.000	6,3	2	2,5	3
180.000-450.000	10	1	2	2,5

Fig. 147



- c logement de la bavure
s épaisseur de la bavure
b largeur de la bavure
S surface projetée de la pièce
 $s = 0,015 \sqrt{S}$
pour une pièce de révolution
 $s = 0,015 D$ en prenant $\frac{r}{4} \cong 1$

Fig. 148

19.4. Les bavures, qui ne peuvent être éliminées totalement, rendent la poursuite du forgeage impossible. Pour s'en débarrasser, on crée un dispositif permettant de les loger. Il s'agit d'une gouttière. De cette façon, la bavure n'est forgée que sur une petite largeur. Elle peut donc fuir dans la gouttière.

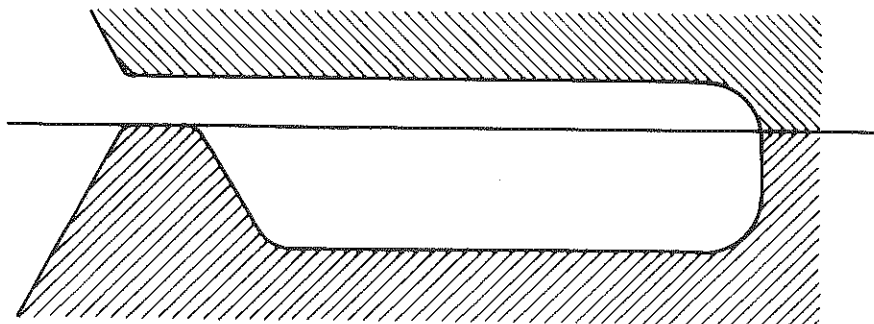


Fig. 149

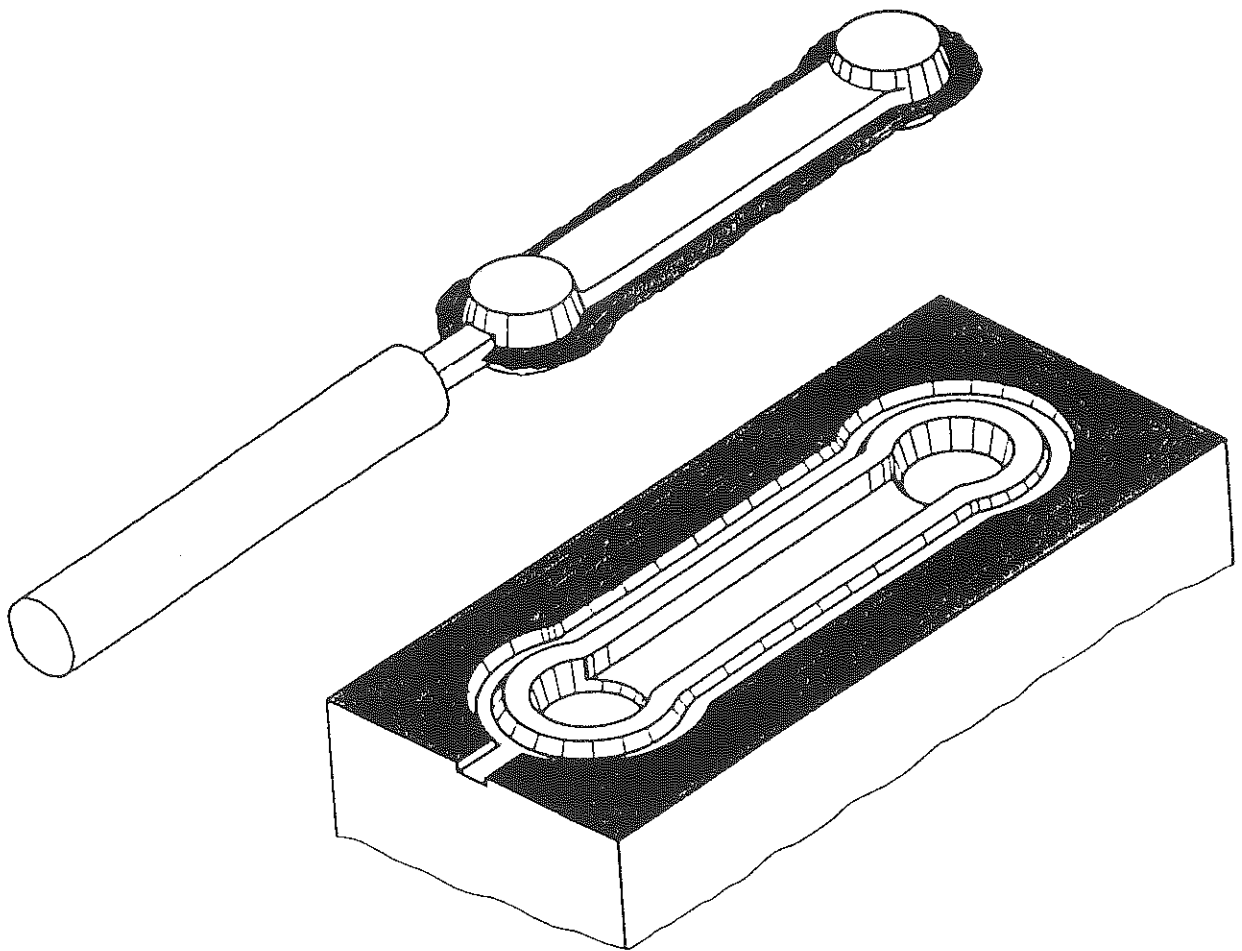
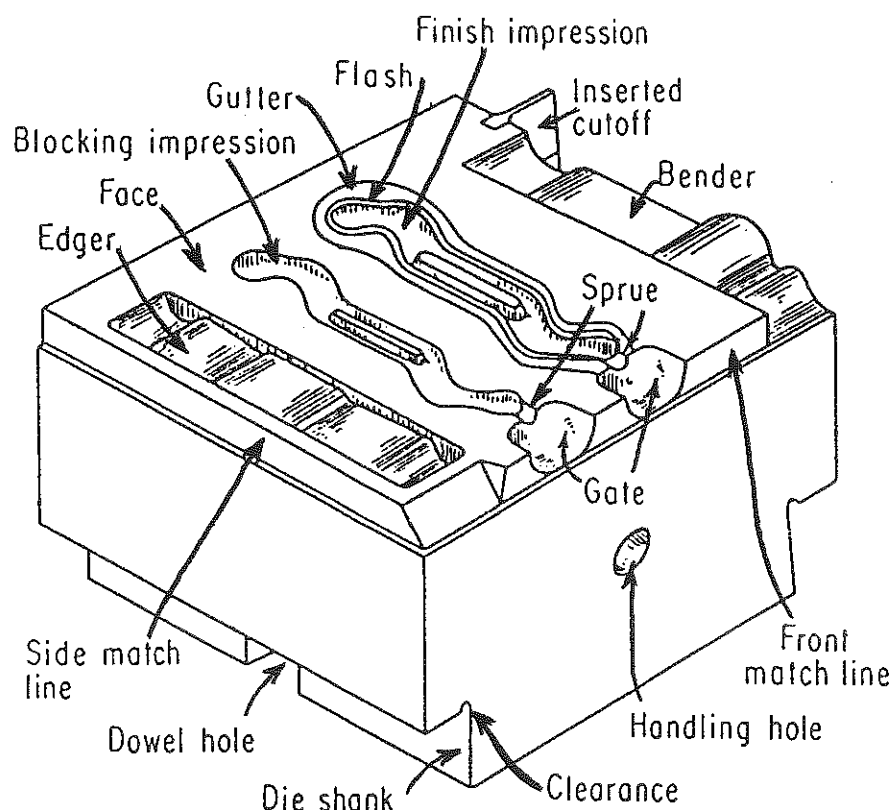


Fig. 150

19.5. La figure ci-contre représente une matrice complète permettant à la fois le formage préliminaire et l'estampage final.



Elements of a die block for drop forging.

1. Edger : pour porter la matière au bon endroit.
2. Bender : pour cambrer la pièce.
3. Blocking Impression : ébauchage.
4. Finish Impression : finition.
5. Cut off : pour couper la pièce de son manche.

La matrice se centre dans un trou de la chabotte, ce qui explique sa forme inférieure. On notera les *dégagements* ou *sorties d'outils* "clearance" destinés à permettre un emboîtement sans problème sur un angle vif. Le trou de manutention (handling hole) est destiné à recevoir une barre qui passe de part en part, à laquelle on attachera les chaînes du pont roulant lors de la manutention. Il n'est jamais inutile de rappeler que l'acier pèse lourd ! Ainsi, si l'on assimile cette étampe à un cube de 0,3 m de côté, on obtient un volume de $0,027 \text{ m}^3$. L'acier pesant 7800 kg/m^3 , cela donne

$$\vee 0,027.7800 \approx 200 \text{ kg.}$$

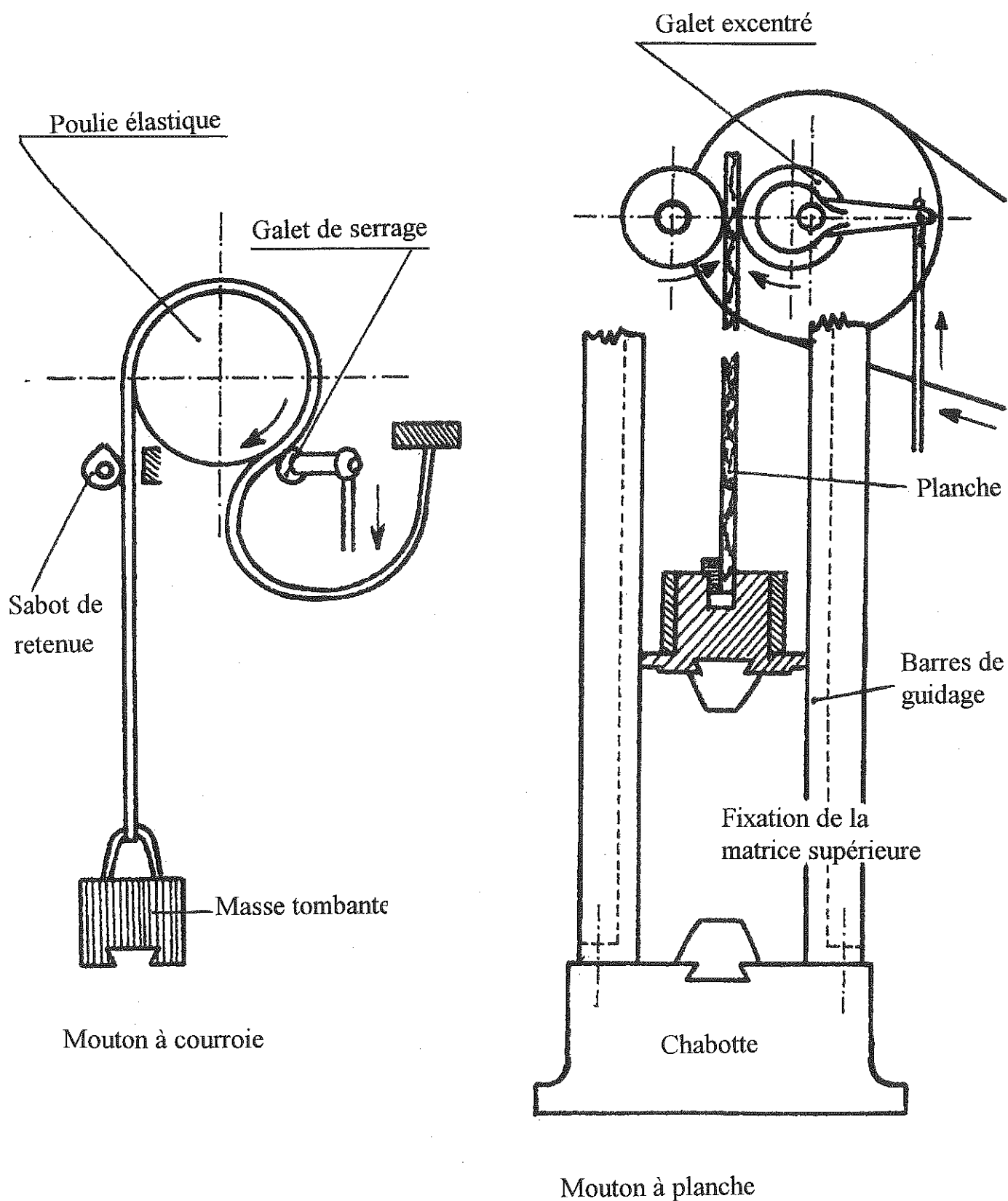
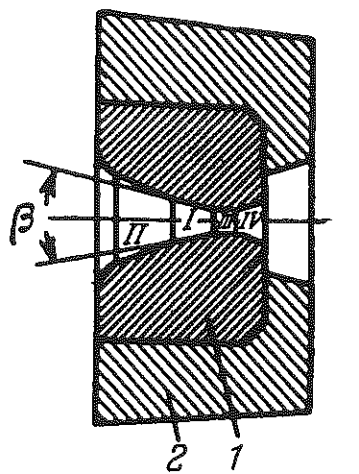


Fig. 152

Tréfilage du métal



Coupe d'une filière

Fig. 153

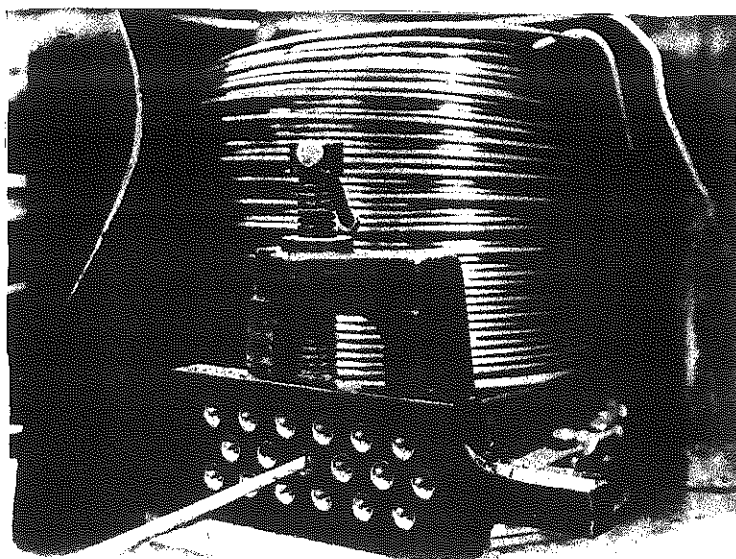


Fig. 154

TREFILAGE

Matrice en acier
à haute teneur en C. et W.
durcie par martelage.
Actuellement matrice
en carbure de Tungstène.



BANC D'ÉTIRAGE

Pour ronds.
Pour plats.

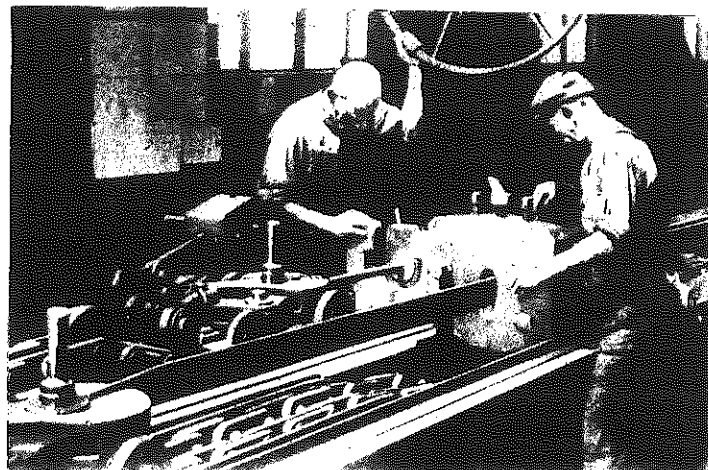


Fig. 155

20. Trefilage

20.1. Le tréfilage consiste à faire passer un barreau dans une filière, *en le tirant en aval*. L'outil de filière est en *carbure de tungstène*.

On y distingue :

II - cône d'entrée

I - cône de travail : angle $\beta = 10...24^\circ$

III - partie cylindrique

IV - cône de sortie

Pour commencer l'étirage, il faut *appointer* l'extrémité. La *vitesse d'étirage* peut être de 130 m/min.

- Dans le système des *barres à la chaîne*, on tire la barre avec une chaîne de 3 à 5 m.
- Dans le système des *barres à la bobine*, le produit est enroulé avant et après l'opération. Ceci suppose des épaisseurs relativement faibles.

20.2. **Opérations préliminaires** : Les barres doivent être *décalaminées, rouillées et séchées*. Il faut lubrifier.

20.3. Coefficients caractéristiques

- coefficient d'étirage : $\mu = \frac{S_1}{S_2}$ (1 = entrée, 2 = sortie)
 $\mu = 1,25 \dots 1,30$

- taux de réduction : $r = 1 - \frac{S_2}{S_1}$ ($r = 0,2 \dots 0,25$)

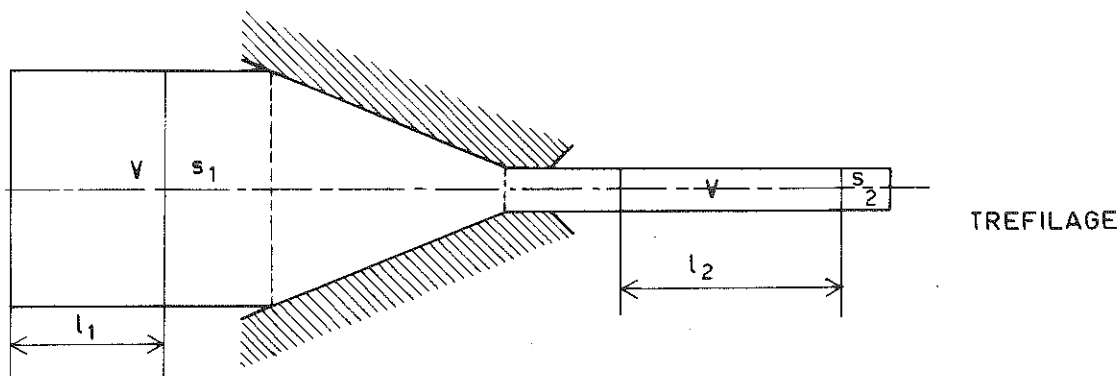
Le *calibrage* est un tréfilage à faible coefficient d'étirage destiné à donner une cote précise :

$$\begin{aligned} \mu &= 1,08 \dots 1,12 \\ r &= 0,07 \dots 0,075 \end{aligned}$$

20.4. Limitations du procédé

Le procédé est limité par la contrainte de traction à la sortie.

On peut faire une théorie élémentaire du tréfilage comme suit :



Considérons un volume V de fil. Avant d'entrer dans la filière, il a une surface S_1 et une longueur l_1 . Après être sorti, il a acquis la longueur l_2 et la surface S_2 . L'incompressibilité suppose

$$V = S_1 l_1 = S_2 l_2.$$

La déformation est semblable à celle d'une barre que l'on allonge, ce qui demande un travail de déformation

$$\mathcal{J}_{def} = \text{Re} \cdot V \cdot \ln \frac{l_2}{l_1} = \text{Re} \cdot V \cdot \ln \frac{S_1}{S_2}$$

Cependant, il existe des frottements le long de la filière. Nous en tiendrons compte à l'aide d'un rendement η , ce qui revient à écrire

$$\mathcal{J} = \frac{1}{\eta} \mathcal{J}_{def} = \frac{\text{Re}}{\eta} V \ln \frac{S_1}{S_2}$$

Pour un temps t , il passe un volume de fil égal à Qt , où Q est le débit. On a donc

$$\mathcal{J}(t) = \frac{\text{Re}}{\eta} Qt \ln \frac{S_1}{S_2}$$

et la puissance est donc

$$P = \frac{\mathcal{J}}{t} = \frac{\text{Re}}{\eta} Q \ln \frac{S_1}{S_2}$$

Notant que $Q = S_2 v_2$, on a encore

$$P = \frac{\text{Re}}{\eta} S_2 v_2 \ln \frac{S_1}{S_2}$$

La force de traction vaut donc

$$F_2 = \frac{P}{v_2} = \frac{\text{Re}}{\eta} S_2 \ln \frac{S_1}{S_2}$$

et elle correspond à une contrainte de traction

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{S_2} = \frac{\text{Re}}{\eta} \ln \frac{S_1}{S_2}$$

qui, pour que le processus soit possible, doit être inférieure à Re.

Nous obtenons donc la condition

$$\ln \frac{S_1}{S_2} < \eta$$

Dans le cas idéal $\eta = 1$, la limitation est donc

$$\frac{S_1}{S_2} < 2,71828\dots$$

En admettant un rendement de 30 %, on obtient

$$\frac{S_1}{S_2} < e^{0,3} \approx 1 + 0,3 = 1,3$$

Remarque :

Si, au lieu de tirer, on poussait à l'entrée, on aurait, au signe près, *la même contrainte*. En effet,

$$P = \frac{R_e}{\eta} Q \ln \frac{S_1}{S_2}$$

$$Q = S_1 v_1$$

$$F_1 = \frac{P}{v_1}$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{S_1 v_1} = \frac{P}{Q} = \frac{\text{Re}}{\eta} \ln \frac{S_1}{S_2}$$

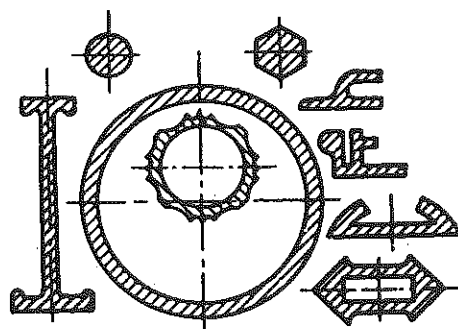
Ce résultat est, naturellement assez paradoxal : on s'attendait, vu que $S_1 > S_2$, à avoir $\sigma_1 < \sigma_2$!

21. Filage à la presse (extrusion)

Le tréfilage est limité par la contrainte de traction, qui doit rester élastique. Cette limitation peut être levée en *poussant* le métal dans la filière. La contrainte n'est pas diminuée, mais en poussant un lopin à l'intérieur d'un cylindre de guidage, on peut compter sur celui-ci pour empêcher l'écrasement du lopin. La situation est comparable à celle d'un liquide dans une seringue. Les *limitations* seraient de deux ordres :

Filage à la presse

Fig. 157



Profils des pièces obtenues par filage

- Les parois du cylindre doivent résister à des pressions de l'ordre de 5 fois la limite élastique du corps extrudé.
- Sous l'effet de ces pressions, il naît un frottement intense. Le développement de l'extrusion des aciers, relativement récent (≈ 1955), repose sur la découverte par Séjournet du lubrifiant convenable, à savoir, le verre fondu.

Moyennant quoi, on parvient à l'heure actuelle à réaliser les coefficients d'étirage suivants :

Métal	S_1 / S_2
Al et alliages légers	200
Aciers doux	3,3
Aciers alliés	2,5

Fig. 158

On réalise par extrusion un grand nombre de profils (voir FIL2). Il faut distinguer

- le *filage direct*, où le profil sort dans le même sens que le piston. L'inconvénient de ce procédé, par ailleurs le plus simple, est que le lopin frotte contre le cylindre, ce qui provoque une grande augmentation d'effort,

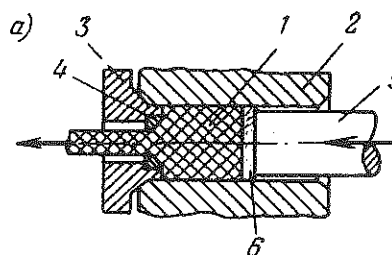
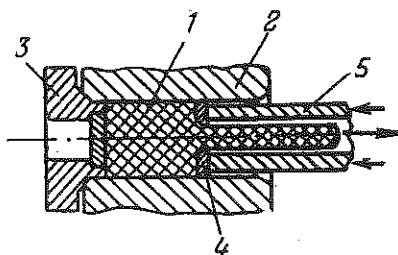


Fig. 159

- le *filage inverse* permet d'éviter cet inconvénient en faisant sortir le fil à l'intérieur du piston.



Enfin, on peut, en faisant passer un mandrin à travers le piston et la filière, fabriquer des tubes. Ce procédé est utilisé pour enrober les fils électriques d'isolant plastique. Le tube est alors l'isolant et le mandrin, le fil de cuivre lui-même.

Fig. 160

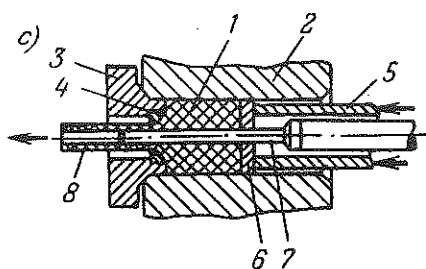


Fig. 161

22. Roulage des filets

Le roulage des filets est une opération permettant d'obtenir un filetage par déformation plastique. La disposition des fibres obtenue de cette manière est bien plus intéressante que par tournage. En outre, le diamètre moyen de la partie filetée est à peu de chose près égal au diamètre de la tige, ce qui est plus favorable en fatigue. Enfin, l'état de surface est meilleur.

Le matériau doit avoir

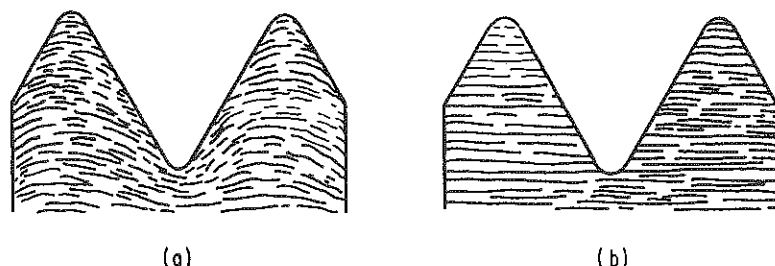
$$A \geq 8 \%, R_e \leq 1000 \text{ MPa.}$$

On peut travailler avec deux rouleaux, et une réglette de support, ou entre trois rouleaux.

Le roulage peut être effectué avant ou après traitement thermique. La seconde technique, plus difficile à mettre en oeuvre, fournit des vis de meilleure qualité mécanique.

Type of thread	Surface roughness - micro inches							
	250	125	63	32	16	8	4	2
Screw machine chased threads								
Milled threads								
Ground threads								
Rolled threads								

Fig. 162



Typical grain flow: (a) in a rolled thread; (b) in a ground or machined thread.

Fig. 163

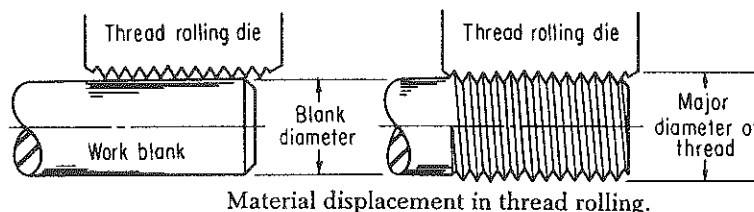


Fig. 164

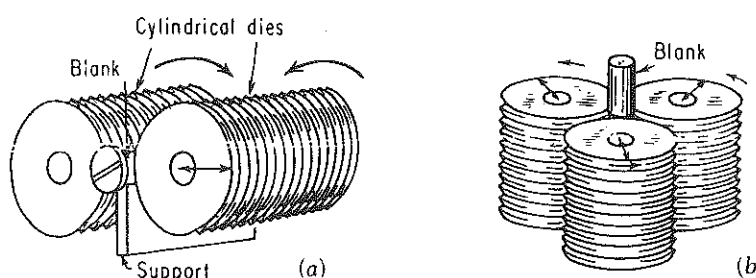


Fig. 165

Cylindrical-die machines: (a) two-die type; (b) three-die type.

23. Estampage à froid

L'estampage à froid permet de dresser des surfaces ou de leur imprimer une gravure (pièces de monnaie). On peut travailler en estampe ouverte, permettant une bavure, ou en estampe fermée (fig. 166).

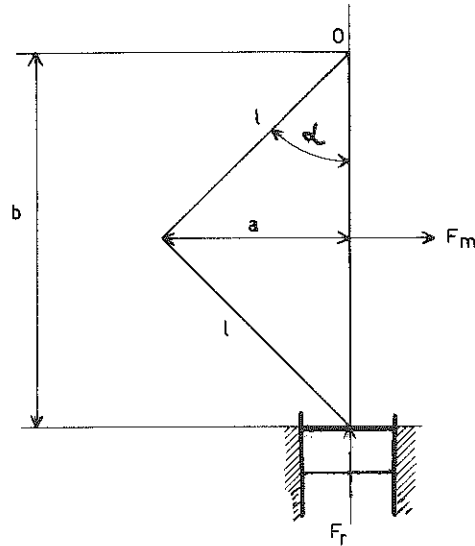


Fig. 166

On utilise souvent dans ce procédé une presse à genouillère, dont le principe est le suivant :

On a

$$\begin{cases} a = l \sin \alpha \\ b = 2l \cos \alpha \end{cases}$$

Variant α , on obtient

$$\begin{cases} \delta a = l \cos \alpha \delta \alpha \\ \delta b = -2l \sin \alpha \delta \alpha \end{cases}$$

L'équilibre implique

$$F_m (-\delta a) + F_r (-\delta b) = 0$$

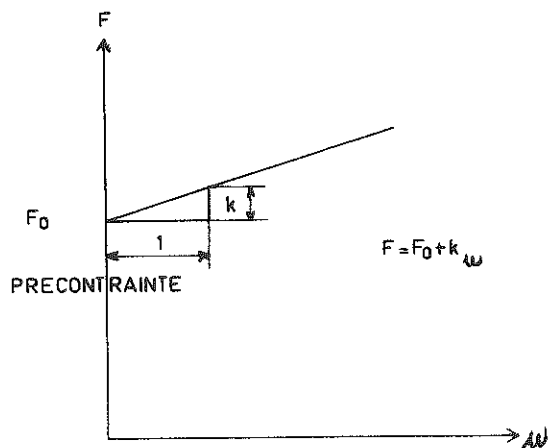
soit

$$-F_m l \cos \alpha \delta \alpha + F_r 2l \sin \alpha \delta \alpha = 0$$

ou

$$F_r = F_m \cotg \alpha$$

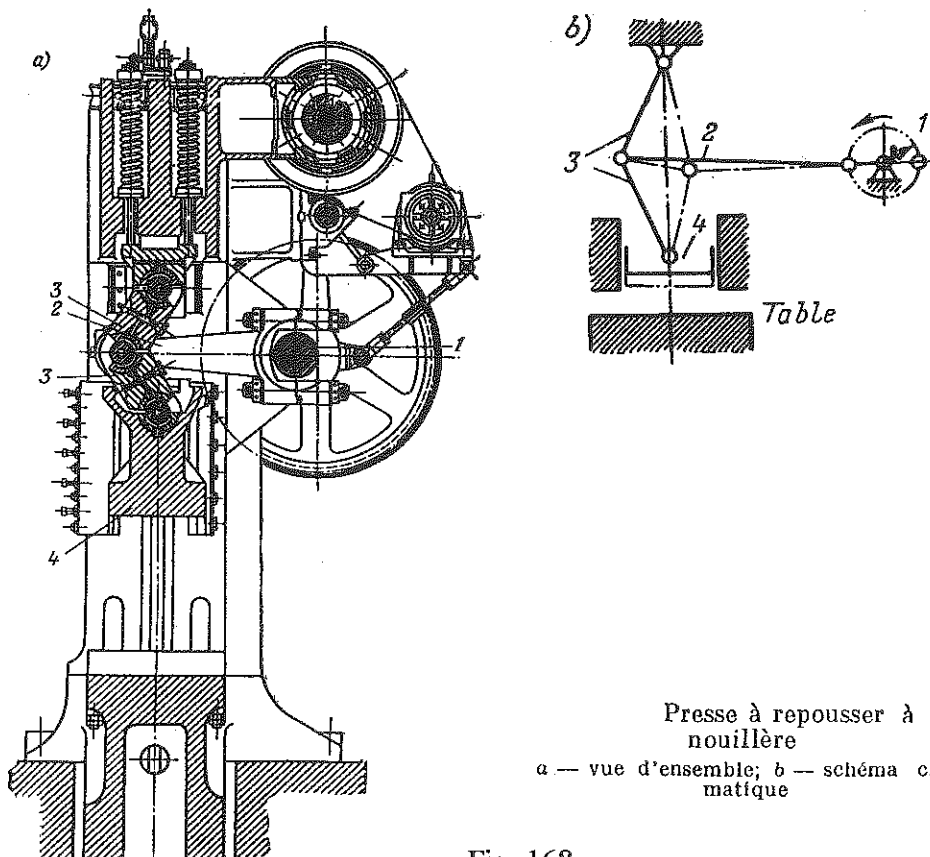
Pour un petit angle α , on peut donc obtenir une amplification aussi grande que l'on veut. Pour la sécurité de la machine, il faut cependant limiter F , ce qui peut se faire à partir d'une mesure de l'allongement des montants verticaux. La presse représentée sur la figure 167 est équipée d'une sécurité consistant en un palier supérieur monté sur ressorts précontraints. Tant que l'effort vertical au palier ne dépasse pas la précontrainte des ressorts, le palier reste en place. Lorsque cet effort est dépassé, le palier se soulève. A partir de ce moment, l'effort vaudra



$F = F_0 + k\Delta w$,
et si les ressorts sont bien choisis,
cet effort ne sera jamais dangereux
pour la machine.

Fig. 167

Opérations de l'estampage à froid



Presse à repousser à ge-
nouillère
a — vue d'ensemble; b — schéma ciné-
matique

Fig. 168

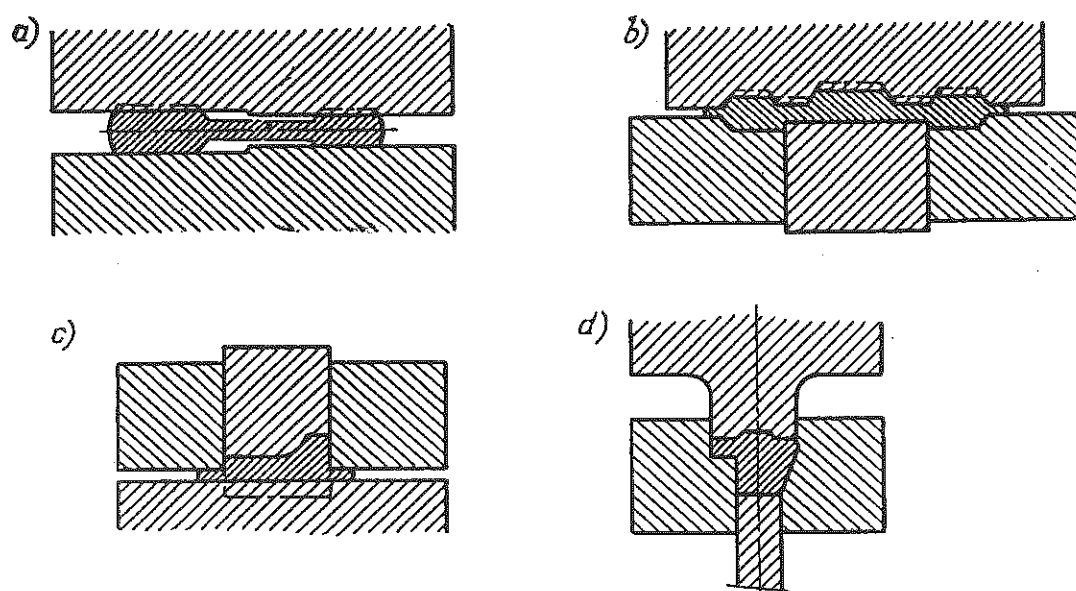


Fig. 169

Bibliographie - Forgeage

1. R. DIETRICH *et al.* : *Précis de construction mécanique. Tome 2.* AFNOR, Paris, 1979.
2. L. GUILLET, A. PORTEVIN : *Précis de métallographie microscopique et de macrographie.* Dunod, Paris, 1924.
3. W. JOHNSON, P.B. MELLOR : *Plasticity for Mechanical Engineers.* Van Nostrand, London, 1962.
4. W. KOENIG : *Fertigungsverfahren - Band 4 : Massivumformung.* VDI - Verlag, Düsseldorf, 1983.
5. G.W. ROWE : *Principles of Industrial Metalworking Processes.* Arnold, London, 1977.
6. G.W. ROWE : *Elements of Metalworking Theory.* Arnold, London, 1979.
7. J.C. SHARMAN : *Drop, Press and Machine Forging.* Machinery's Standard Reference Series, London, 1963.
8. E. SIEBEL : *Le façonnage des métaux par déformation plastique.* Béranger, Paris et Liège, 1936.
9. L.R. UNDERWOOD : *The Rolling of Metals.* Chapman and Hall, 1950.
10. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook.* Mc Graw Hill, New York, 1976.

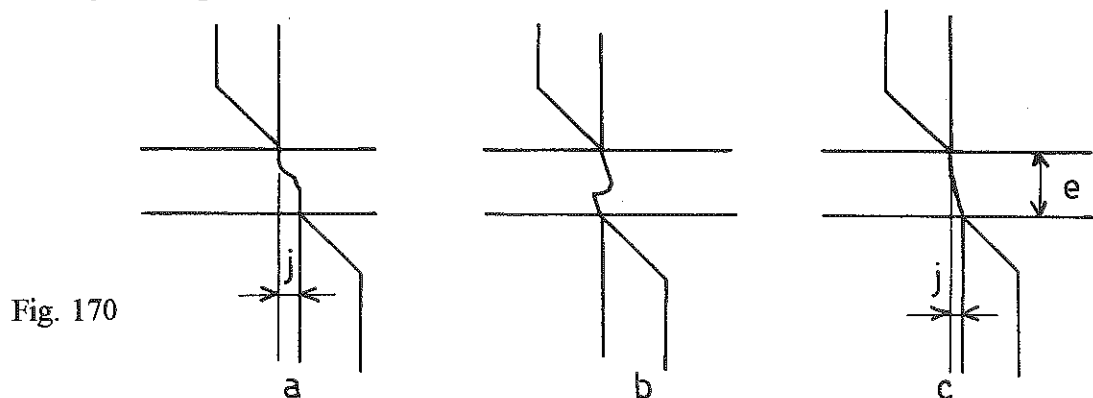
5. TRAVAIL DES MÉTAUX EN FEUILLES

Travail des métaux en feuilles

1. Découpage

Nous commencerons par envisager le découpage à la guillotine. Ce processus permet de dégrossir toute forme *convexe*.

Le *jeu* de la cisaille joue un grand rôle.

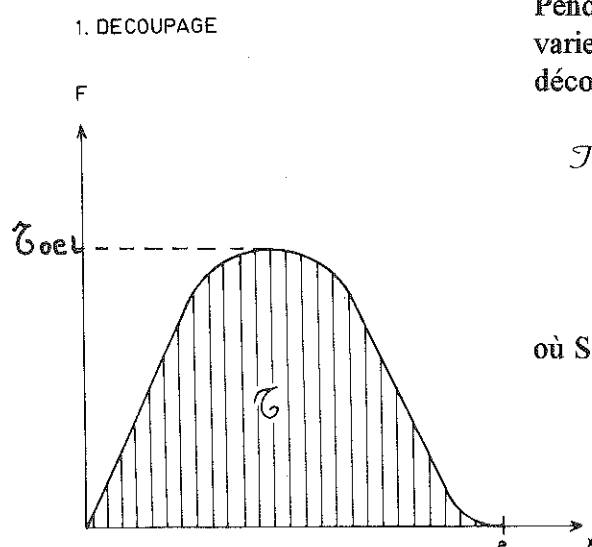


- a) Lorsque le jeu est *trop grand*, la coupe est très oblique. L'effort est anormalement grand.
- b) Dans le cas d'un jeu *trop petit*, la coupe se fait en zig-zag et il y a *talonnement* : la partie coupée ne sort pas sans difficulté.
- c) Il existe un jeu optimal menant à une coupe rectiligne et presque verticale. Ce jeu est donné par la condition

$$\frac{j}{e} = 4 \text{ à } 5 \%$$

Dans le cas d'une cisaille droite, l'effort maximal vaut

$$F = \tau_0 \cdot e l$$



Pendant la course de longueur e de la cisaille, l'effort varie comme indiqué ci-contre. Le travail de découpage vaut environ

$$\mathcal{J} = 0,6 \cdot (\tau_0 \cdot e l) \cdot e$$

$$0,6 \tau_0 S e^2$$

où S est la section à couper.

Fig. 171

On peut diminuer sensiblement l'effort à l'aide d'une cisaille oblique. Dans ce cas, en effet, pour une course δx , on coupe une surface

$$\delta S = e \delta x \cot g \lambda$$

où λ est l'angle d'inclinaison de la cisaille. Le travail correspondant vaut

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{J} &= 0,6 \cdot \tau_0 \cdot \delta S \cdot e \\ &= 0,6 \tau_0 e^2 \delta x \cot g \lambda \end{aligned}$$

La force est donc

$$F = \frac{\delta \mathcal{J}}{\delta x} = 0,6 \tau_0 e^2 \cot g \lambda$$

Généralement, cette valeur est *très inférieure* à $\tau_0 e l$.

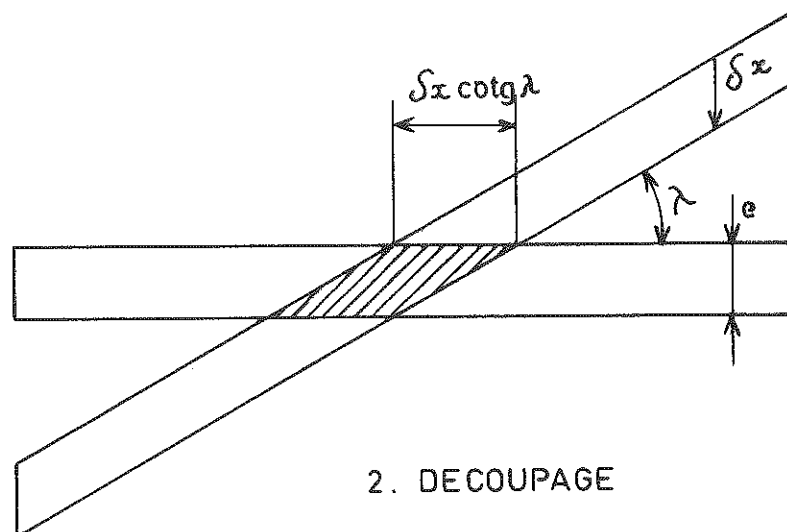


Fig. 172

Soient par exemple

$$e = 1 \text{ mm}, \quad l = 200 \text{ mm}, \quad \lambda = 5^\circ$$

On a

$$\frac{F(\lambda)}{F(0)} = \frac{1}{200} \cdot \cot g(5) = 0,05715$$

Les angles d'inclinaison courants sont

- 2 ... 6° pour les lames longues
- 15 ... 20° pour les barres courtes

Une inclinaison *trop forte* peut provoquer le *cintrage* ou le *vrillage* dans le cas de bourdes étroites.

Valeur de τ_o - Théoriquement, on a $\tau_o = 0,8 R_m$. Cependant, pour tenir compte des frottements et de l'usure de l'arête des lames, on préfère compter avec la valeur

$$\tau_o = R_m$$

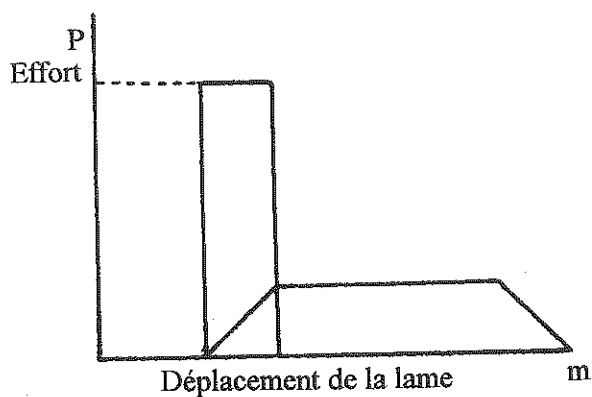


Fig. 173

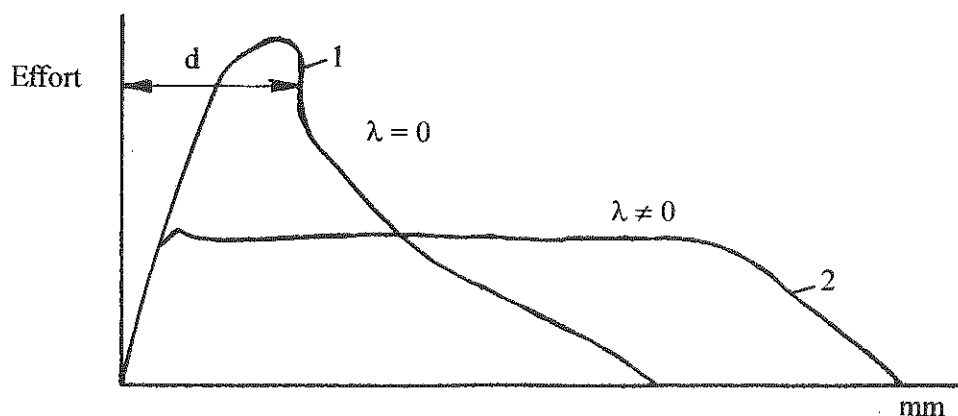


Fig. 174

Sur la guillotine ...

Fait tomber !

Ber ! ber !

Fait sauter !

Ter ! Ter :

Fait tomber;

Fait sauter;

Fait voler

La tête ! ...

C'est bien plus honnête !

– Eh bien, messieurs, dit le roi, vous riez; si, cependant, cette machine de M. Guillotin était destinée à épargner des souffrances terribles aux malheureux condamnés ! Que demande la société, quand elle réclame la mort d'un coupable ? La suppression pure et simple de l'individu. Si cette suppression est accompagnée de souffrances, comme dans la roue, comme dans l'écartèlement, ce n'est plus une justice, c'est une vengeance.

– Mais, sire, observa Suleau, qui dit à Votre Majesté que la douleur est supprimée par le fait de la section de la tête ? Qui dit que la vie ne persiste pas à la fois dans ces deux tronçons, et que le moribond ne souffre pas doublement, ayant la conscience de sa dualité ?

– Cela, dit le roi, c'est une question à faire discuter par les gens de l'art; au reste, une expérience a dû être faite, je crois, à Bicêtre, ce matin même; personne de vous n'assistait à cette expérience ?

– Non, sire ! non, non, non ! dirent presque simultanément douze ou quinze voix railleuses.

– J'y étais, moi, sire, dit une voix grave.

Le roi se retourna, et reconnut Gilbert, qui était entré pendant la discussion, s'était approché respectueusement, et qui, s'étant tu jusque-là, répondait seulement à l'interrogation du roi.

– Ah ! c'est vous, docteur, dit le roi tressaillant; ah ! vous étiez là ?

– Oui, sire.

– Et comment l'expérience a-t-elle réussi ?

– Parfaitement sur les deux premiers, sire; mais, au troisième, quoique la colonne vertébrale eût été tranchée, on a été forcé d'achever la section de la tête avec un couteau.

Les jeunes gens écoutaient la bouche ouverte et les yeux hagards.

– Comment ! sire, dit Charles Lameth parlant visiblement au nom de tous les autres en même temps qu'au sien, on a exécuté trois hommes, ce matin ?

– Oui, messieurs, dit le roi; seulement, ces trois hommes étaient trois cadavres fournis par l'Hôtel-Dieu. Et votre avis monsieur Gilbert ?

– Sur quoi, sire ?

– Sur l'instrument.

Sire, c'est évidemment un progrès à côté de toutes les machines du même genre inventées jusqu'aujourd'hui; mais l'accident arrivé au troisième cadavre prouve que cette machine a besoin de perfectionnement.

– Et comment est-elle faite ? demanda le roi, chez lequel s'éveillait le génie du mécanisme.

Alors, Gilbert essaya de donner une explication; mais, comme le roi, d'après les paroles du docteur, ne pouvait saisir la forme exacte de l'instrument :

– Venez, dit-il, venez, docteur; voici sur une table des plumes, de l'encre et du papier ... Vous dessinez, je crois ?

– Oui, sire.

– Eh bien, vous me ferez un croquis, je comprendrai mieux.

Et, comme les jeunes gentilhommes, retenus par le respect, n'osaient suivre le roi sans y être invités :

– Oh ! venez, venez, messieurs, dit Louis XVI, ces questions-là intéressent l'humanité tout entière. – Et puis, qui sait, dit Suleau à demi-voix, qui sait si l'un de nous n'est pas destiné à l'honneur d'épouser mademoiselle Guillotine ? Allons, messieurs, allons faire connaissance avec notre fiancée.

Et tous, suivant le roi et Gilbert, se groupèrent autour de la table devant laquelle, pour exécuter plus facilement son dessin, Gilbert s'assit, sur l'invitation du roi. Gilbert commença le croquis de la machine, dont Louis XVI suivit les lignes avec la plus scrupuleuse attention.

Rien n'y manquait, ni la plate-forme, ni l'escalier qui y conduisait, ni les deux poteaux, ni la bascule, ni la petite fenêtre, ni le fer taillé en croissant.

Il achevait à peine ce dernier détail, que le roi l'arrêta.

– Parbleu ! dit-il, il n'y a rien d'étonnant à ce que l'expérience ait manqué, surtout à la troisième fois.

– Comment cela, sire ? demanda Gilbert.

– Cela tient à la forme du couperet ; dit Louis XVI ; il faut n'avoir aucune idée de mécanique pour donner, à un objet destiné à trancher une matière offrant résistance, la forme d'un croissant.

– Mais quelle forme Votre Majesté lui donnerait-elle donc ?

– C'est bien simple, celle d'un triangle.

Gilbert essaya de rectifier le dessin.

– Non, non, pas cela, dit le roi, pas cela. Donnez-moi votre plume.

– Sire, dit Gilbert, voici la plume et la chaise.

– Attendez, attendez, dit Louis XVI emporté par son amour de la mécanique ; tenez, taillez-moi le fer en biseau, ainsi ... là ! ainsi ... et je vous réponds que vous couperiez vingt-cinq têtes, à la suite les unes des autres, sans que le fer rebutât sur une seule.

Il achevait à peine ces paroles, qu'un cri déchirant, un cri d'effroi, presque de douleur, retentit au-dessus de sa tête.

Il se retourna vivement, et vit la reine pâle, chancelante, éperdue, qui tombait évanouie aux bras de Gilbert.

Poussée comme les autres par la curiosité, elle s'était approchée de la table, et, se penchant sur la chaise du roi, elle avait, par-dessus son épaule, au moment même où il en corrigeait le principal détail, reconnu la hideuse machine que Cagliostro lui avait fait voir, vingt ans auparavant, au château de Taverney-Maison-Rouge.

A cette vue, elle n'avait eu de force que pour jeter un cri terrible, et, la vie l'ayant abandonnée, comme si la fatale machine eût opéré sur elle, elle était, ainsi que nous l'avons dit ; tombée évanouie entre les bras de Gilbert.

(A. DUMAS – *La Comtesse de Charny*)

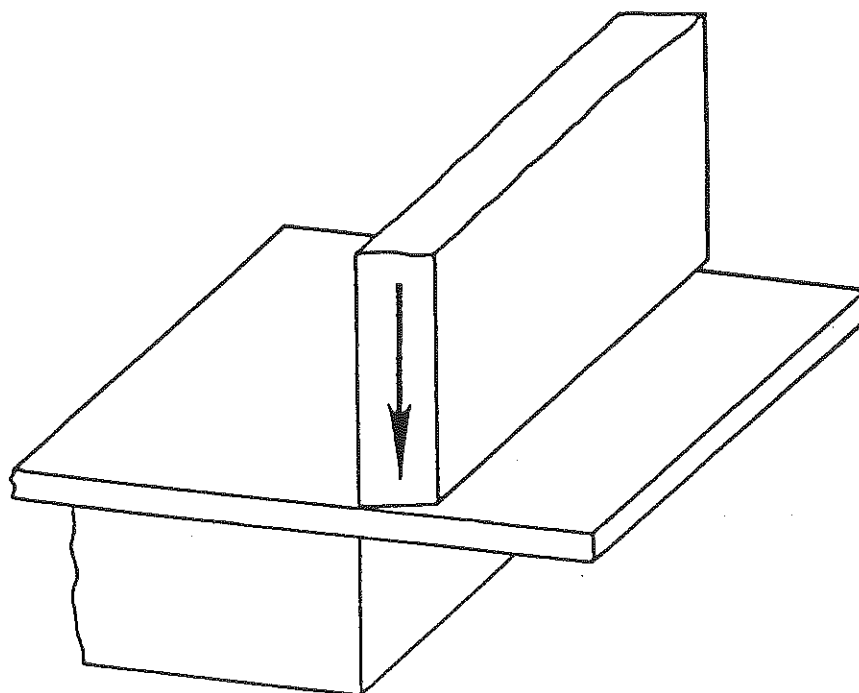


Fig. 175

Le découpage à la molette permet de découper des formes courbes. Ce procédé est mis à profit dans certains ouvre-boîtes. On peut cisailer ainsi une épaisseur de 2 mm au maximum.

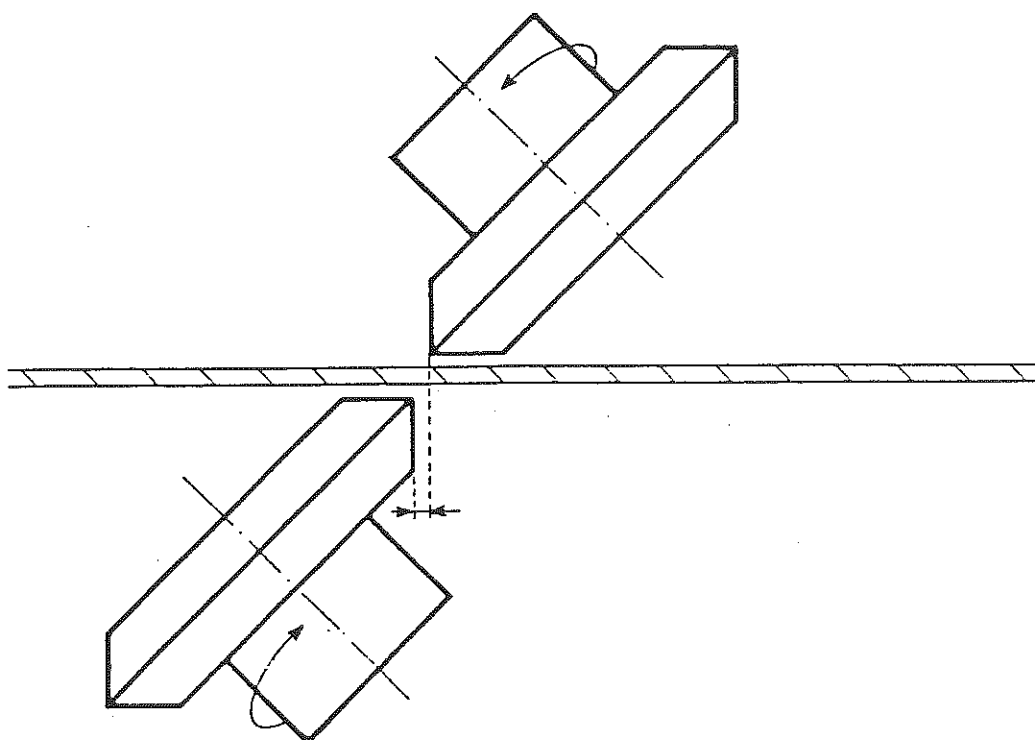


Fig. 176

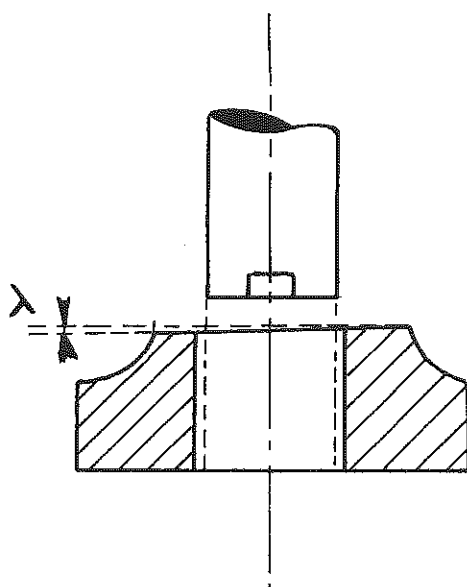


Fig. 177

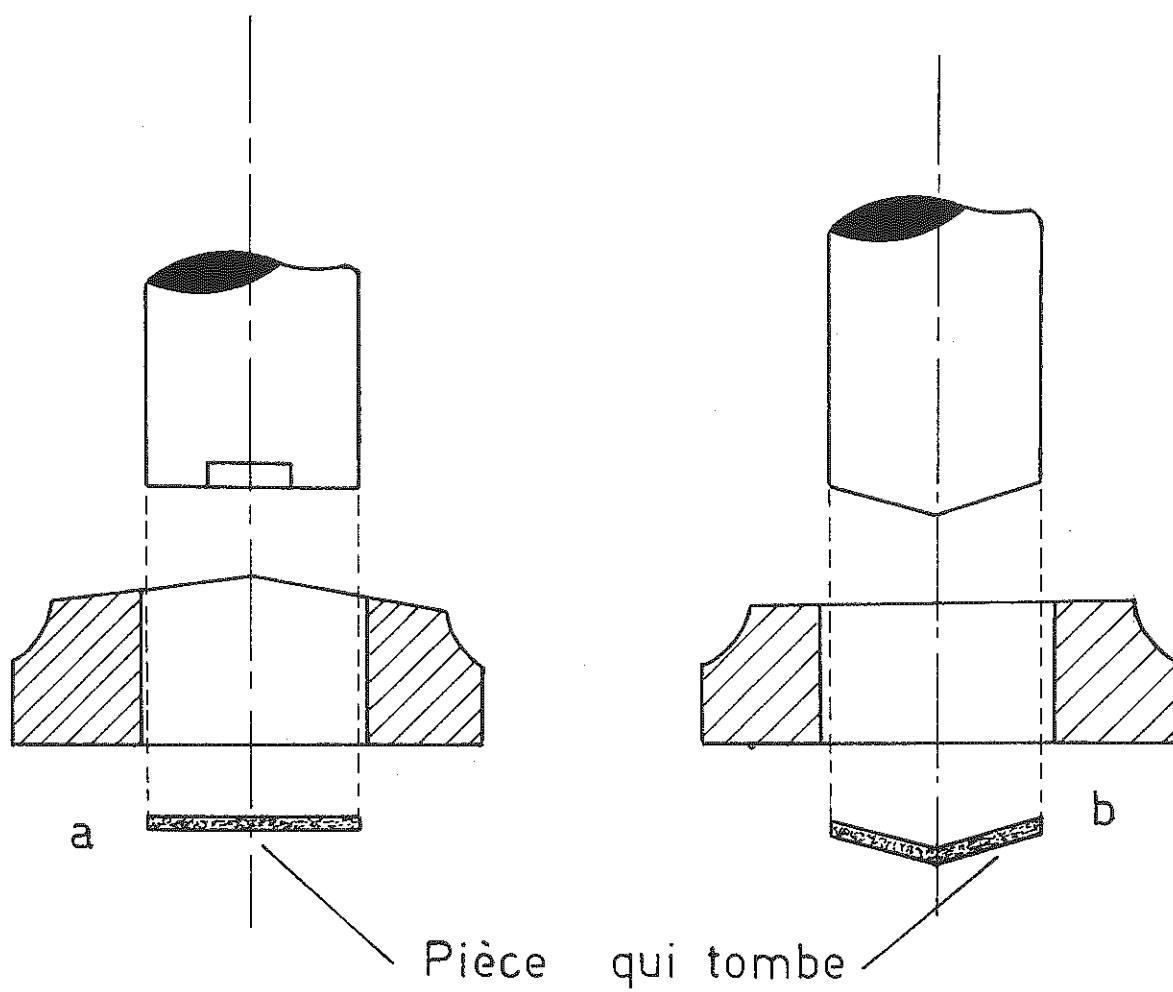
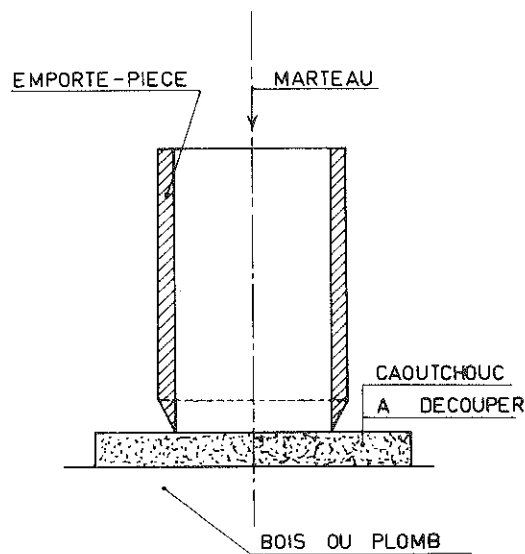


Fig. 178

2. Poinçonnage

Il s'agit de faire un *trou* (poinçonnage proprement dit)
une *rondelle* (découpage)

2.1. Emporte-pièce. C'est un outil servant pour les matériaux mous (caoutchouc en feuille, cuir,...)



2.2. Travail au poinçon

Fig. 179

Après découpage, la rondelle, cisillée en oblique, est entrée à force dans l'alésage de la matière. Il en résulte

$$\varnothing_{\text{rondelle}} = \varnothing_{\text{matrice}}$$

Quant au trou, il frotte sur le poinçon, si bien que

$$\varnothing_{\text{trou}} = \varnothing_{\text{poinçon}}$$

Une *inclinaison* λ permet de réduire l'effort. C'est ce que l'on appelle la *vague*. Ici le poinçon fait la rondelle et la matrice, le trou : selon que la vague est donnée au poinçon ou à la matrice, le résultat sera différent.

On notera que les perforatrices à papier ont une vague au poinçon.

2.3. En réalisant le poinçon et la matrice avec des *bossages* et des *évidements*, on réduit le travail de rectification des outils usés.

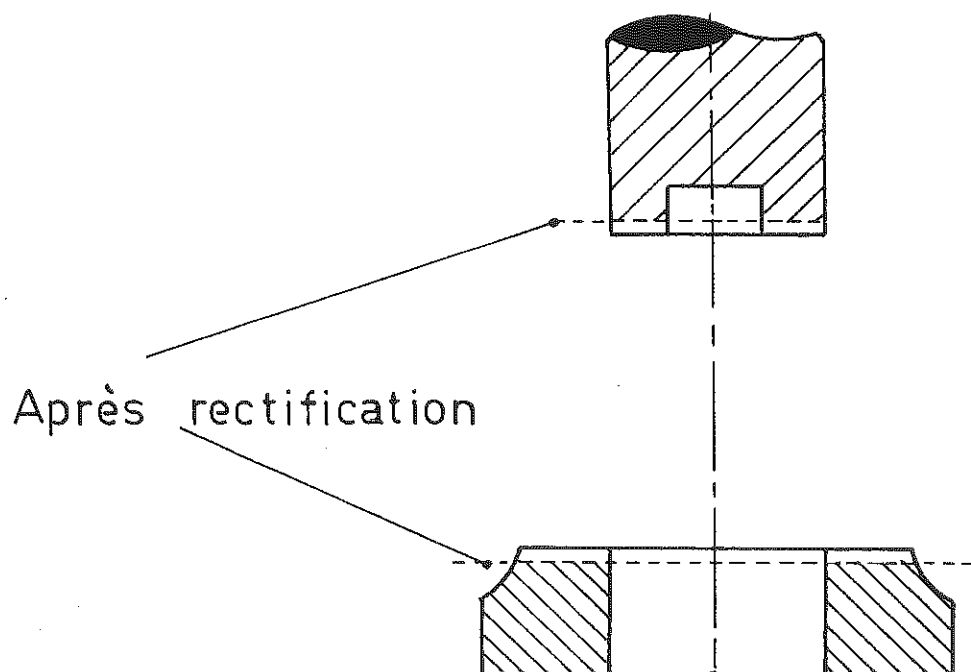


Fig. 180

2.4. Lors de la course de retour, le poinçon tend à entraîner la tôle. Il faut donc placer un *extracteur* pour l'empêcher de remonter.

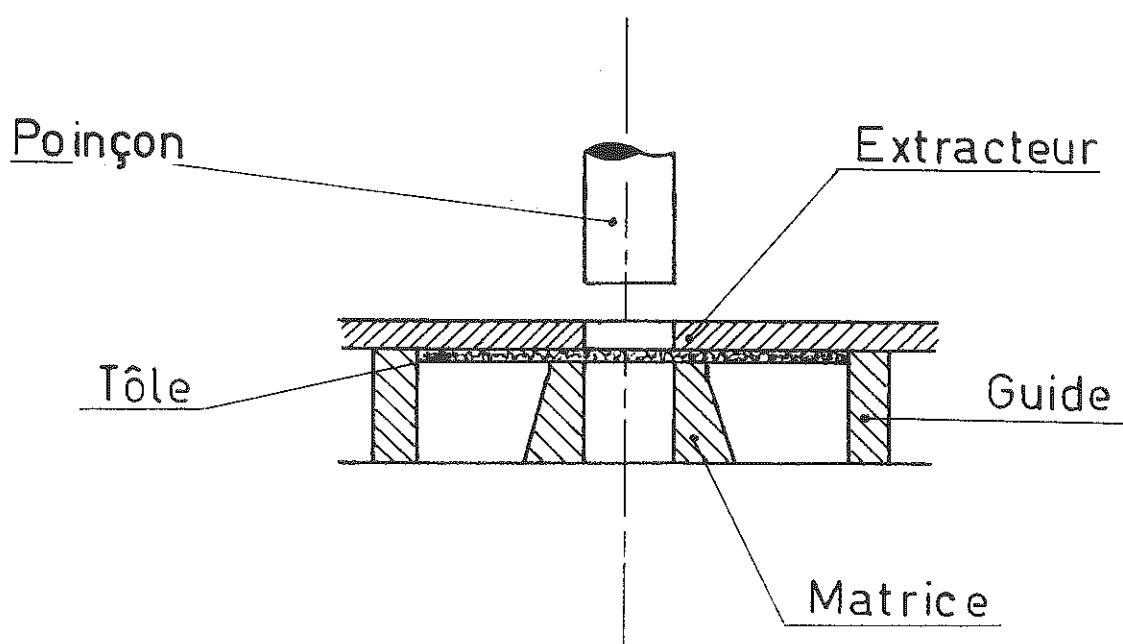


Fig. 181

2.5. Une *dépouille* doit être prévue dans la matrice pour éviter que la rondelle ne se coince. Idéalement, la matrice aura la forme d'un cylindre suivi d'un cône, ce qui permettra de la réaffûter sans modifier le diamètre.

Cependant, une *dépouille* allant jusqu'au sommet est également acceptable, car elle n'entraîne qu'une très faible modification du rayon après affûtage.

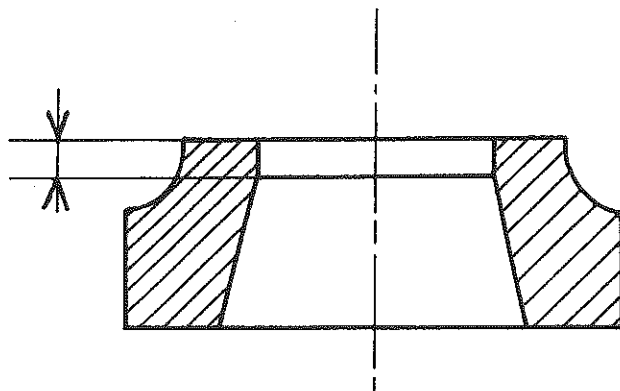
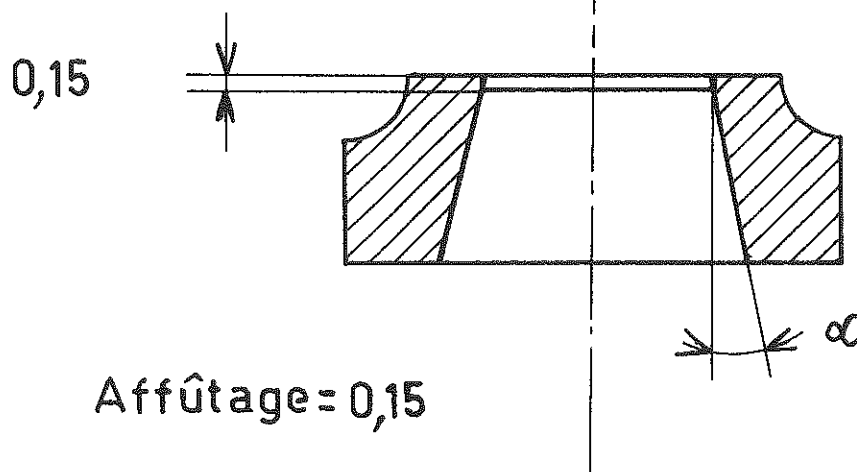


Fig. 182



α	$1/2^\circ$	$3/4^\circ$	1°	$1^\circ 1/4$
Δr	0,0013	0,0019	0,0026	0,0033

Fig. 183

2.6. L'effort de poinçonnage est

$$F = \tau_0 L e \quad \begin{array}{l} L = \text{périmètre poinçonné} \\ e = \text{épaisseur} \end{array}$$

Pour les mêmes raisons qu'en découpage, on table sur

$$\tau_0 = R_m \text{ (au lieu de } 0,8 R_m \text{)}$$

2.7. Limitation due au flambement

La longueur du poinçon doit être suffisamment faible, pour éviter son flambement.

En admettant le mode de flambement ci-contre, on a

$$F_{fl} = \frac{\pi^2 EI}{4l^2}$$

On devrait donc avoir

$$F < \frac{\pi^2 EI}{4l^2}$$

soit

$$2l < \pi \sqrt{\frac{EI}{F}}$$

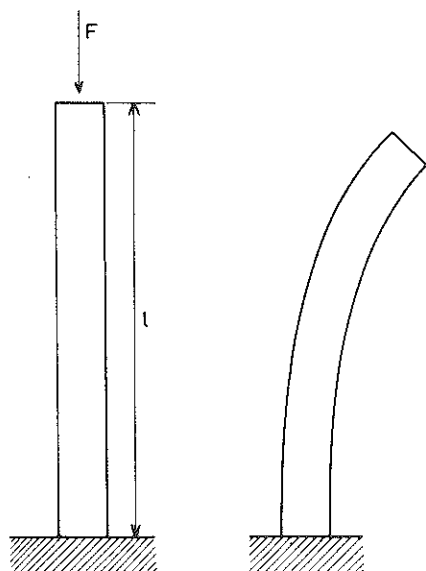


Fig. 184

L'effort de coupe est donné par

$$F = \tau_0 L e$$

ce qui mène à la condition

$$2l < \pi \sqrt{\frac{EI}{\tau_0 L e}}$$

On en déduit
$$\frac{2l}{e} < \pi \sqrt{\frac{EI}{\tau_o Le^3}}$$

Or, on doit avoir
$$\frac{l}{e} > K,$$

avec $K = 2,5$, par exemple, pour garantir le poinçonnage. Il en découle la condition

$$2K < \pi \sqrt{\frac{E}{\tau_o}} \sqrt{\frac{I}{Le^3}}$$

ou encore,

$$\boxed{\frac{Le^3}{I} < \pi^2 \frac{E}{\tau_o} \frac{1}{4K^2}}$$

Ceci fixe une limitation aux épaisseurs que l'on peut découper

Exemple : trou circulaire $I = \frac{\pi d^4}{64}$ $L = \pi d$

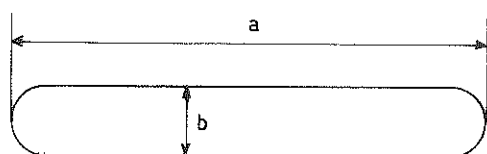
$$\Rightarrow \frac{64 e^3}{d^3} < \pi^2 \frac{E}{\tau m K^2}$$

Pour

$$\left. \begin{array}{l} E = 210.000 \text{ MPa} \\ \tau_o = 700 \text{ MPa} \\ K = 2,5 \end{array} \right\} \frac{e^3}{d^3} < \frac{\pi^2 \cdot 210.000}{64 \cdot 700} \cdot \frac{1}{4 \cdot 2,5^2} = \frac{7,402}{4} = 1,851$$

$$\frac{e}{d} < 1,228$$

Le problème ne se pose pas dans ce cas. Il se pose surtout si L est grand et I petit : trous allongés.



$$I \approx \frac{ab^3}{12} \quad L \approx 2a$$

$$\frac{Le^3}{I} = \frac{24a e^3}{ab^3} = 24 \left(\frac{e}{b}\right)^3 < 118,4$$

$$\frac{e^3}{b^3} < 4,934$$

$$\frac{e}{b} < 1,702$$

Fig. 185

3. Pliage

La figure ci-contre illustre l'utilisation de tôles pliées pour faire les angles d'une cabine d'ascenseur.

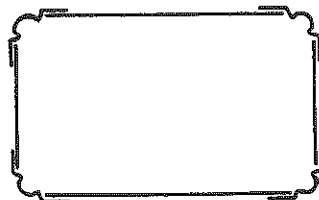


Fig. 187

3.1. Le rayon du poinçon est limité par la déformation maximale de la tôle. On notera que la fibre neutre est située à une distance x de la fibre intérieure, avec

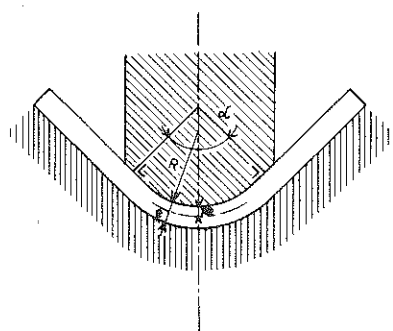


Fig. 188

$$\begin{cases} x = 0,5 \text{ si } \frac{R}{e} \geq 3 \\ x = 0,4 \text{ si } \frac{R}{e} \approx 2 \\ x = 0,3 \text{ si } \frac{R}{e} \approx 1 \end{cases}$$

Ces valeurs sont approximatives. Elles permettent de développer le flan théorique. En outre, elles permettent de calculer

$$\varepsilon = \frac{(R+e)\alpha - (R+xe)\alpha}{(R+xe)\alpha},$$

valeur qui doit vérifier

$$\varepsilon < A \text{ (allongement à la rupture)}$$

3.2. L'effort à fournir dans le cas d'un pliage en V se calcule théoriquement comme suit :

$$M_f = \frac{F}{2} \frac{a}{2} = \frac{Fa}{4}$$

et, par la plasticité,

$$M_f = R_e \frac{h^2 L}{4},$$

L = largeur de pliage

ce qui donne

$$F = \frac{R_e h^2 L}{a}.$$

En pratique, on fait le calcul avec R_m . Comme en outre, il y a une dissipation par frottement, on écrit

$$F = k \cdot \frac{R_m h^2 L}{a},$$

avec

$$k = 1,08 + 1,94 \frac{e}{a}$$

(valeur expérimentale)

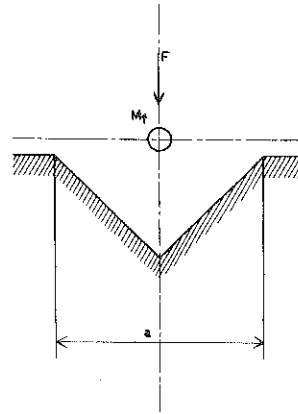


Fig. 189

3.3. Retour élastique

Du fait du retour élastique, il faut prévoir un angle de pliage plus faible que l'angle final (plier plus loin !). On obtient une bonne approximation en posant

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx \frac{3 Re}{E} \cdot \left(\frac{R}{e} + \frac{1}{2} \right)$$

Exemple :

$$R = 0,2 \text{ mm} \quad e = 1 \text{ mm} \quad Re = 210 \text{ MPa} \quad E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx 3 \cdot \frac{210}{210.000} (0,2 + 0,5) = \frac{2,1}{1000}$$

$$\text{Pour } \alpha = 90^\circ, \Delta\alpha = \left(\frac{2,1 \cdot 90}{1000} \right)^\circ = \left(\frac{189}{1000} \right)^\circ = 0,189^\circ$$

Il faut donc une matrice à $89,81^\circ$.

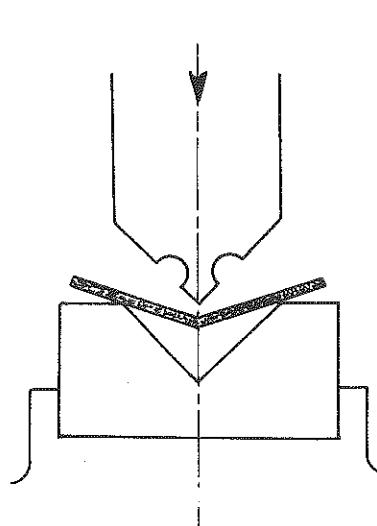


Fig. 190

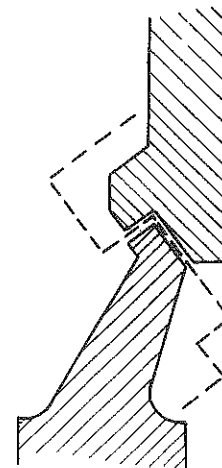


Fig. 191

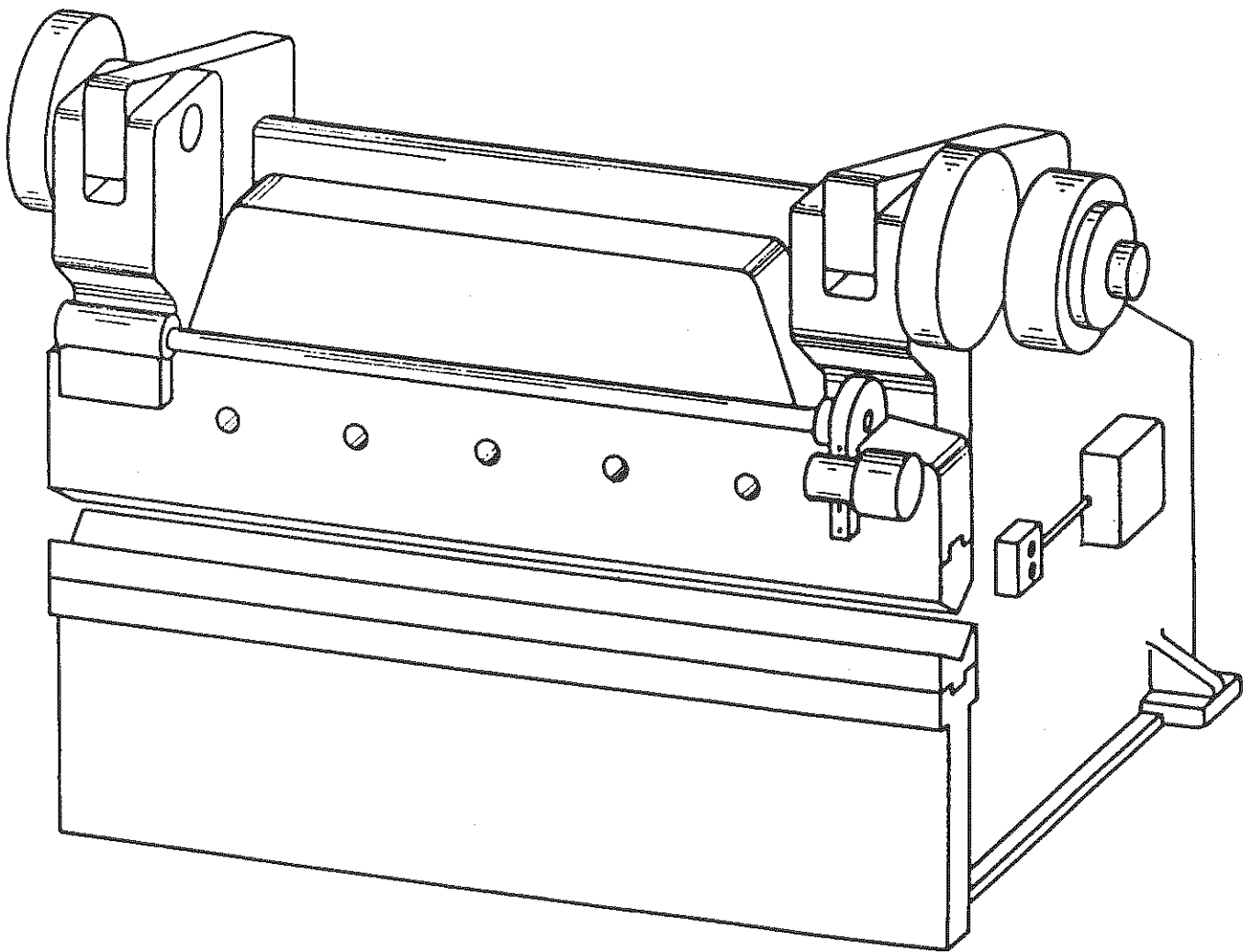
PRESSE A PLIER

Fig. 192

3.4. Les figures 194 et 195 illustrent la fabrication de pièces nécessitant plusieurs pliages. La figure 196 illustre un autre pliage inattendu.

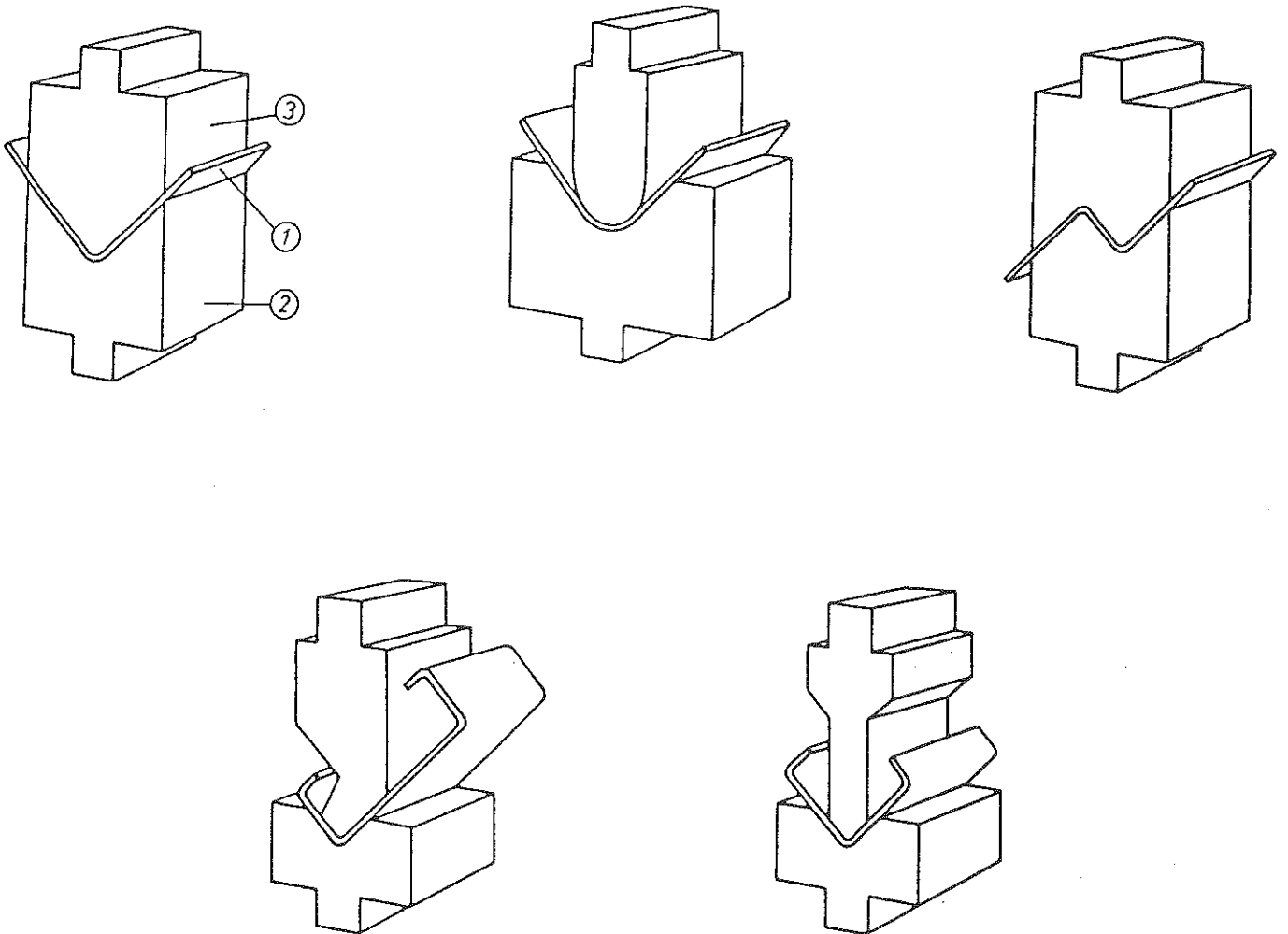


Fig. 193

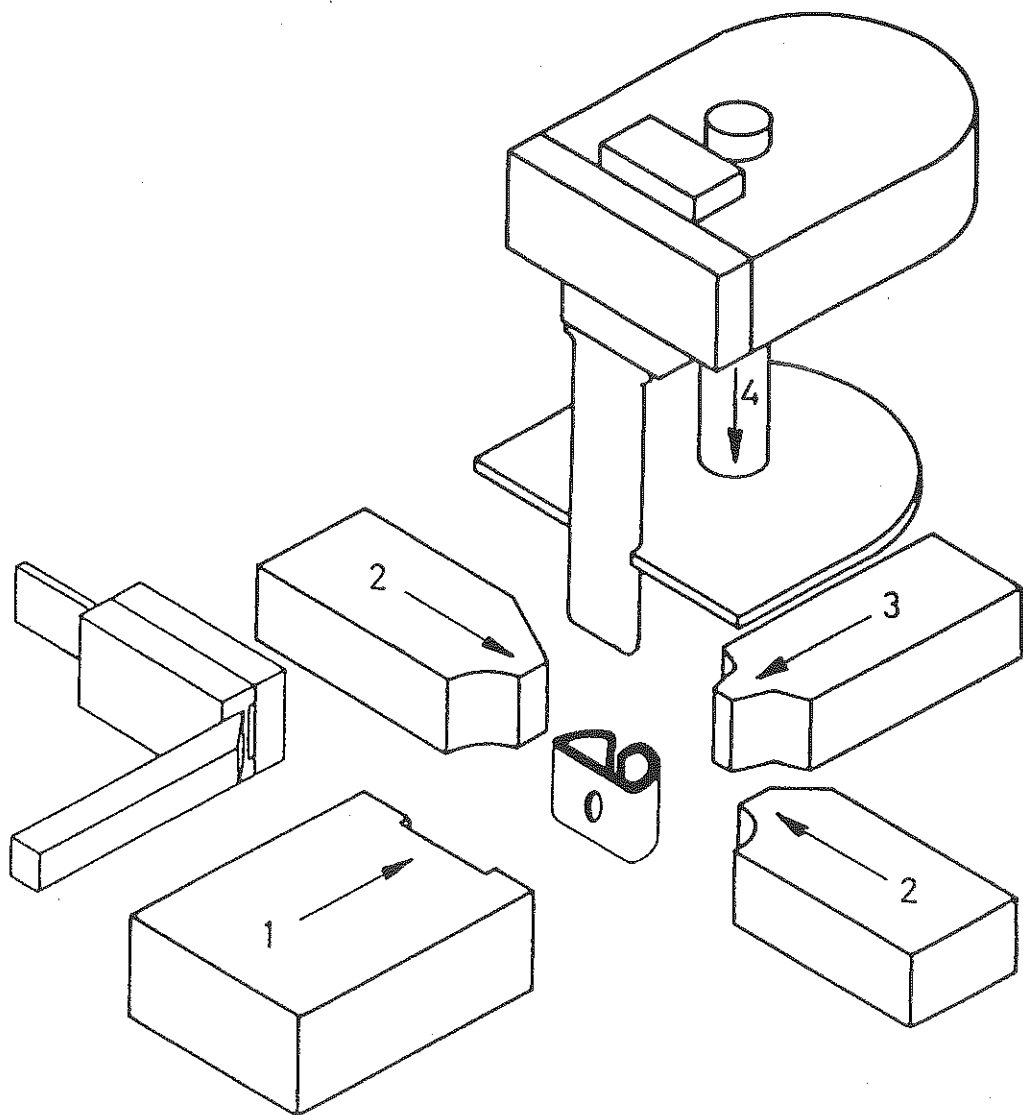


Fig. 194

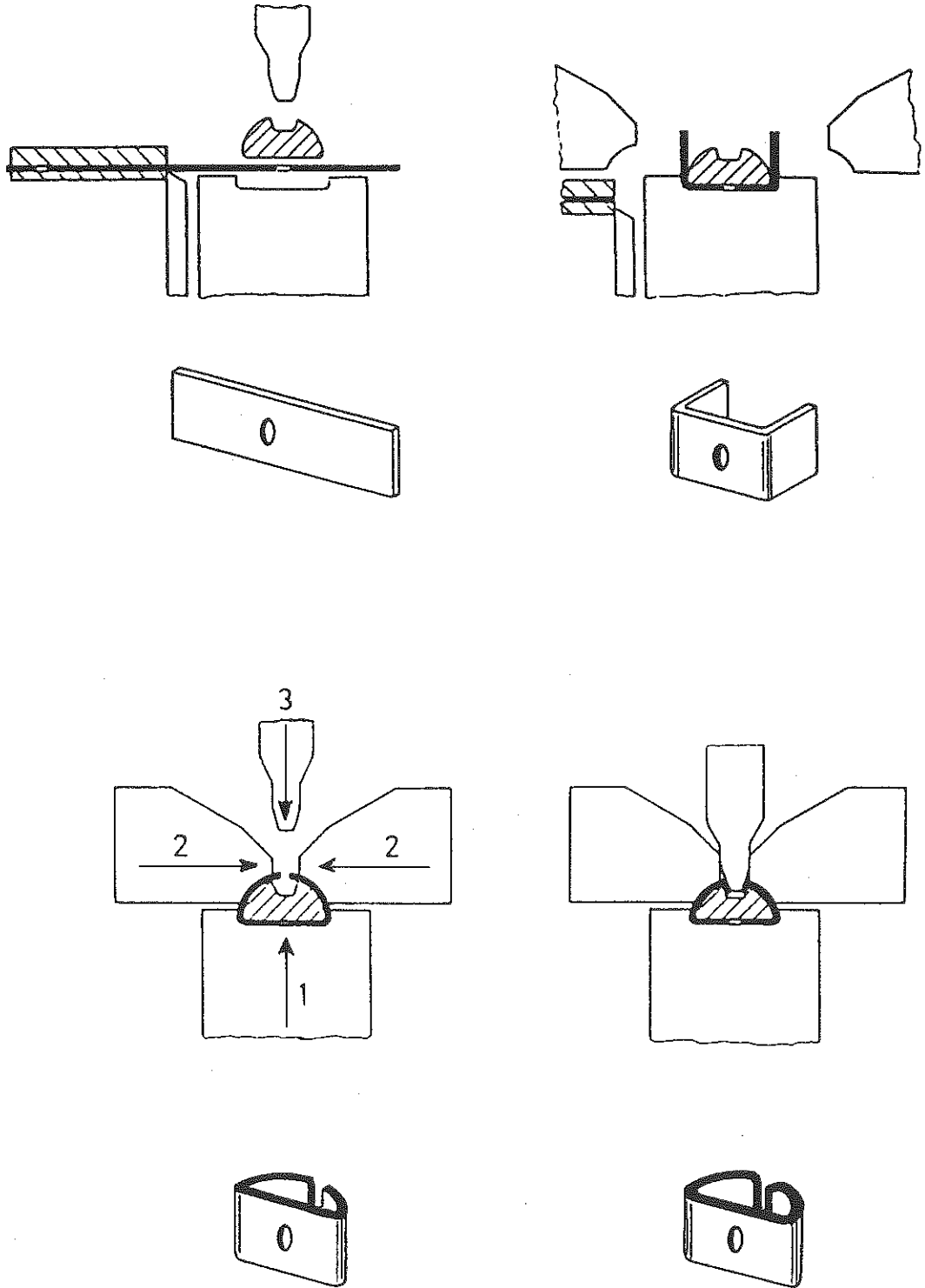


Fig. 195

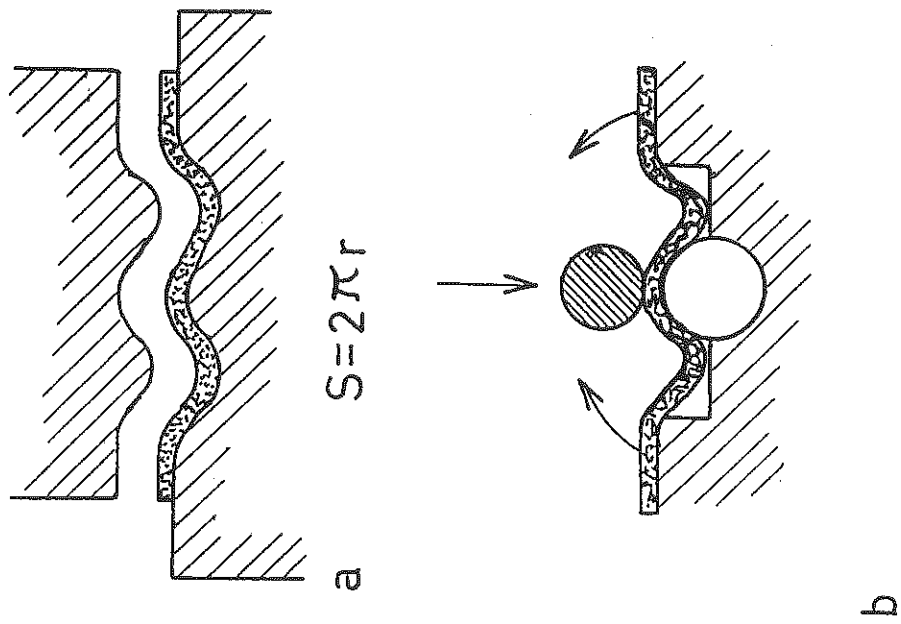
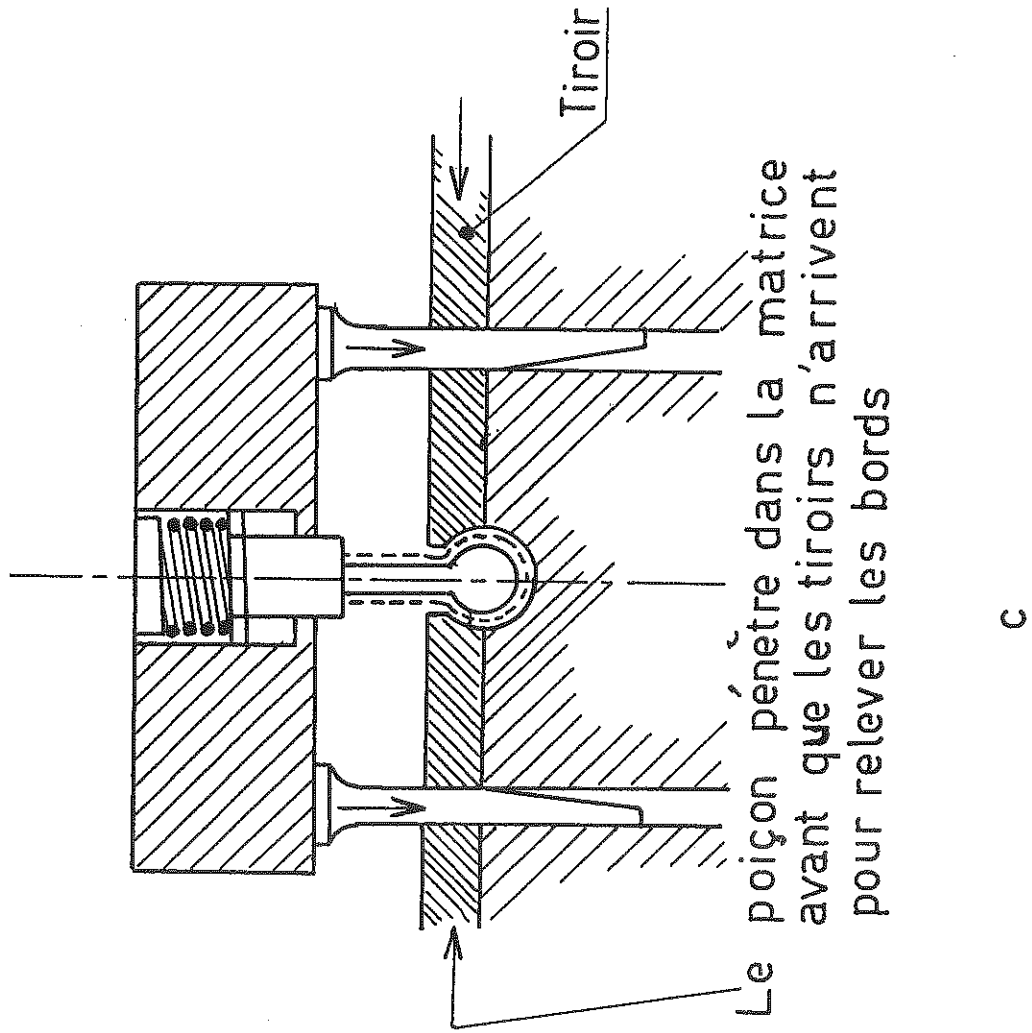
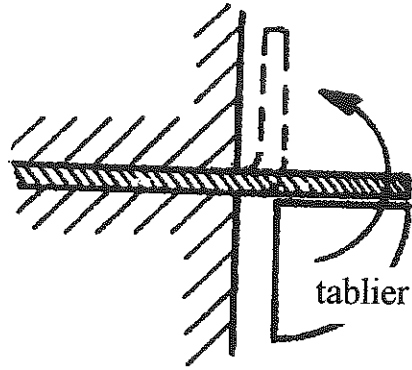


Fig. 196



Plieuse à tablier

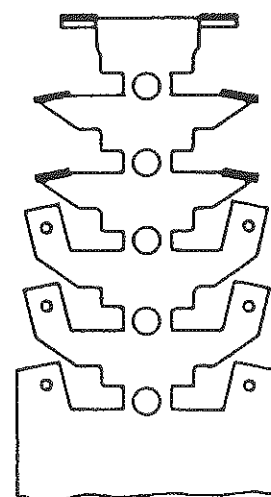
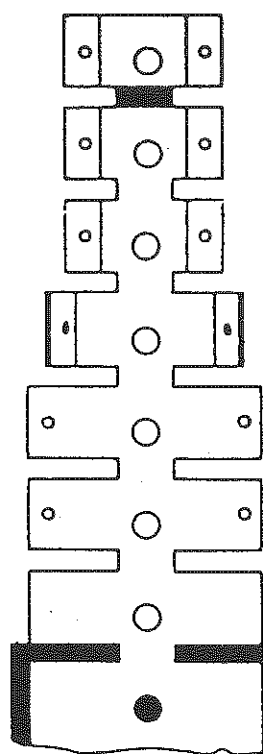
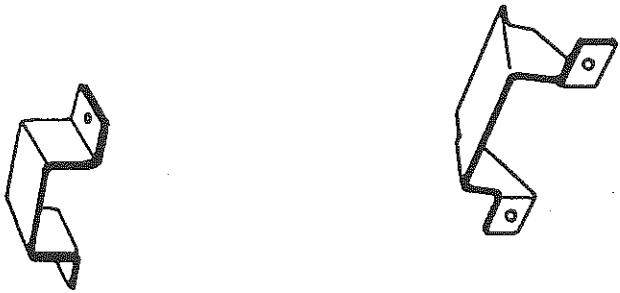


Fig. 198

3.5. Profilage

La figure 199 illustre le principe du profilage à galets. Dans la pratique, on passe de la tôle plane à la tôle profilée en de nombreux bancs de profilage successifs qui, petit à petit, conduisent à la forme finale. La succession des profils successifs, comme à la figure 200, mais présentée en superposant sur un même dessin tous les profils, est appelée *fleur de profilage*. Elle est essentielle pour l'étude du processus qui, signalons-le, est délicat et peut mener à bien des déboires !

C'est notamment le procédé utilisé pour fabriquer des tôles ondulées.

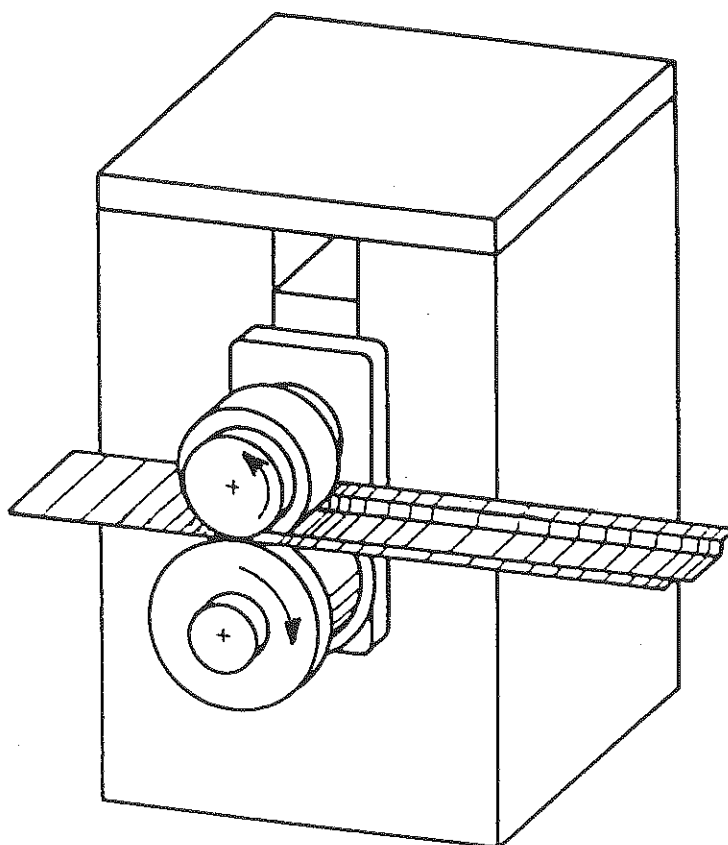


Fig. 199

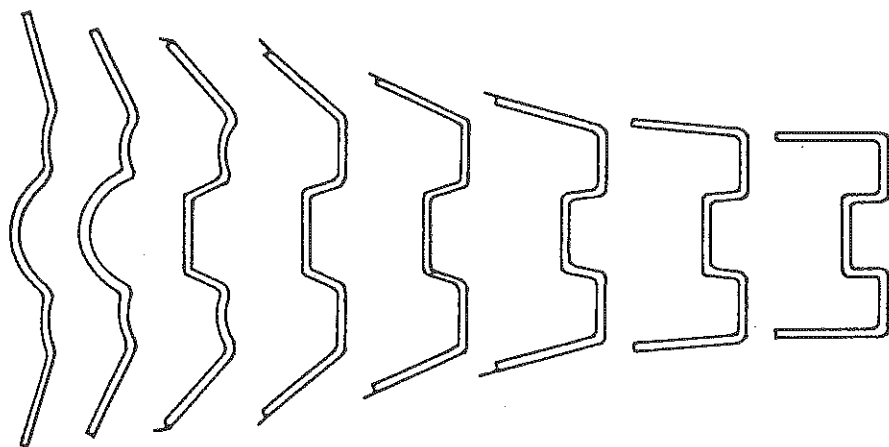
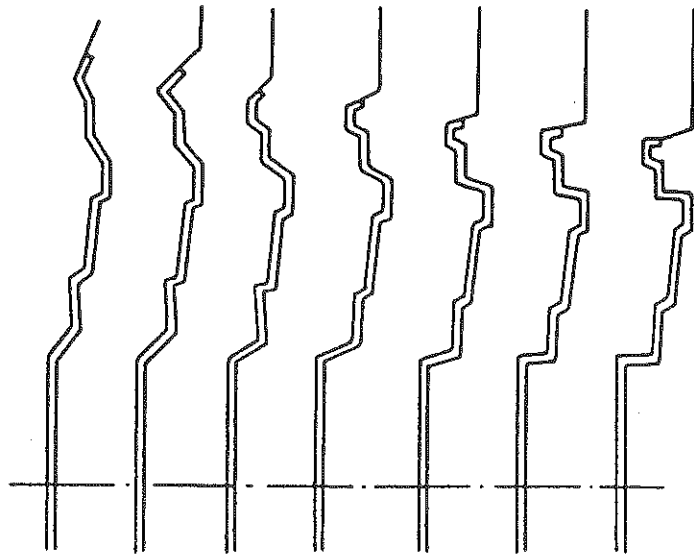


Fig. 200

4. Cintrage

4.1. Le cintrage se fait à l'aide de rouleaux. Avec des rouleaux parallèles, on obtiendra un cylindre. On peut obtenir un cône à l'aide de rouleaux non parallèles, mais il faut prévoir une butée axiale.

Le retour élastique est très important en cintrage.

Supposons que les rouleaux aient imprimé une courbure

$$\chi_o = \frac{1}{R_o}$$

Ceci a été obtenu plastiquement, c'est-à-dire sous un moment de flexion

$$M_p = R_o \frac{e^2}{4} L$$

La relaxation de ce moment va provoquer une déformation élastique

$$\chi = -\frac{M_p}{EI} = -\frac{R_o \frac{e^2}{4} L}{E L \frac{e^3}{12}} = -3 \frac{R_o}{Ee}$$

La courbure obtenue est donc

$$\frac{1}{R} = \chi_o - \chi = \frac{1}{R_o} - 3 \frac{R_o}{Ee}$$

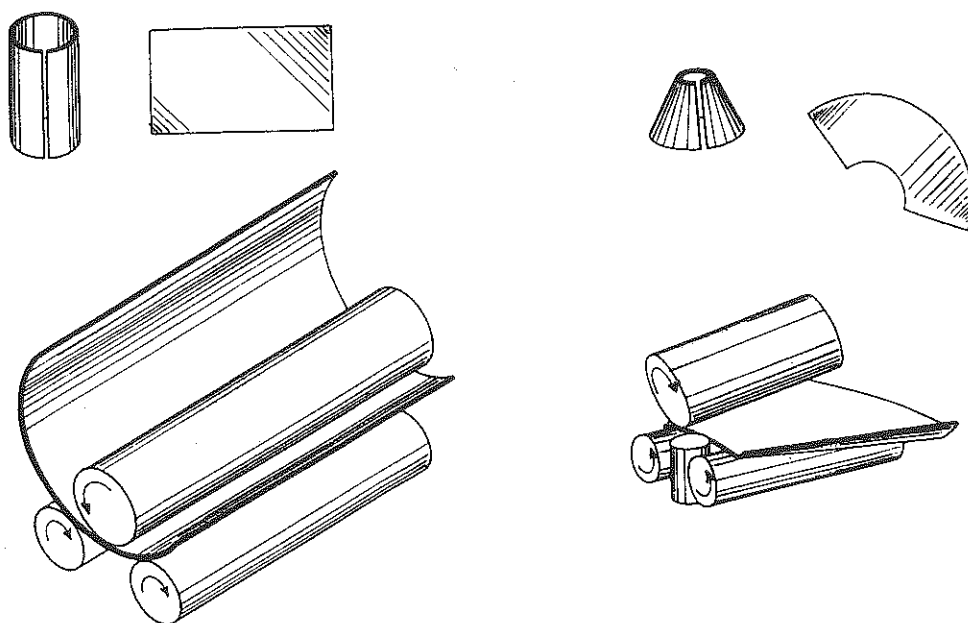


Fig. 201

4.2. Cintrage des tubes

Dans le cas des tubes, la section a tendance à s'aplatir. On y remédie en plaçant une pièce de bourrage dans le tube ou en le guidant latéralement dans une poulie à gorge.

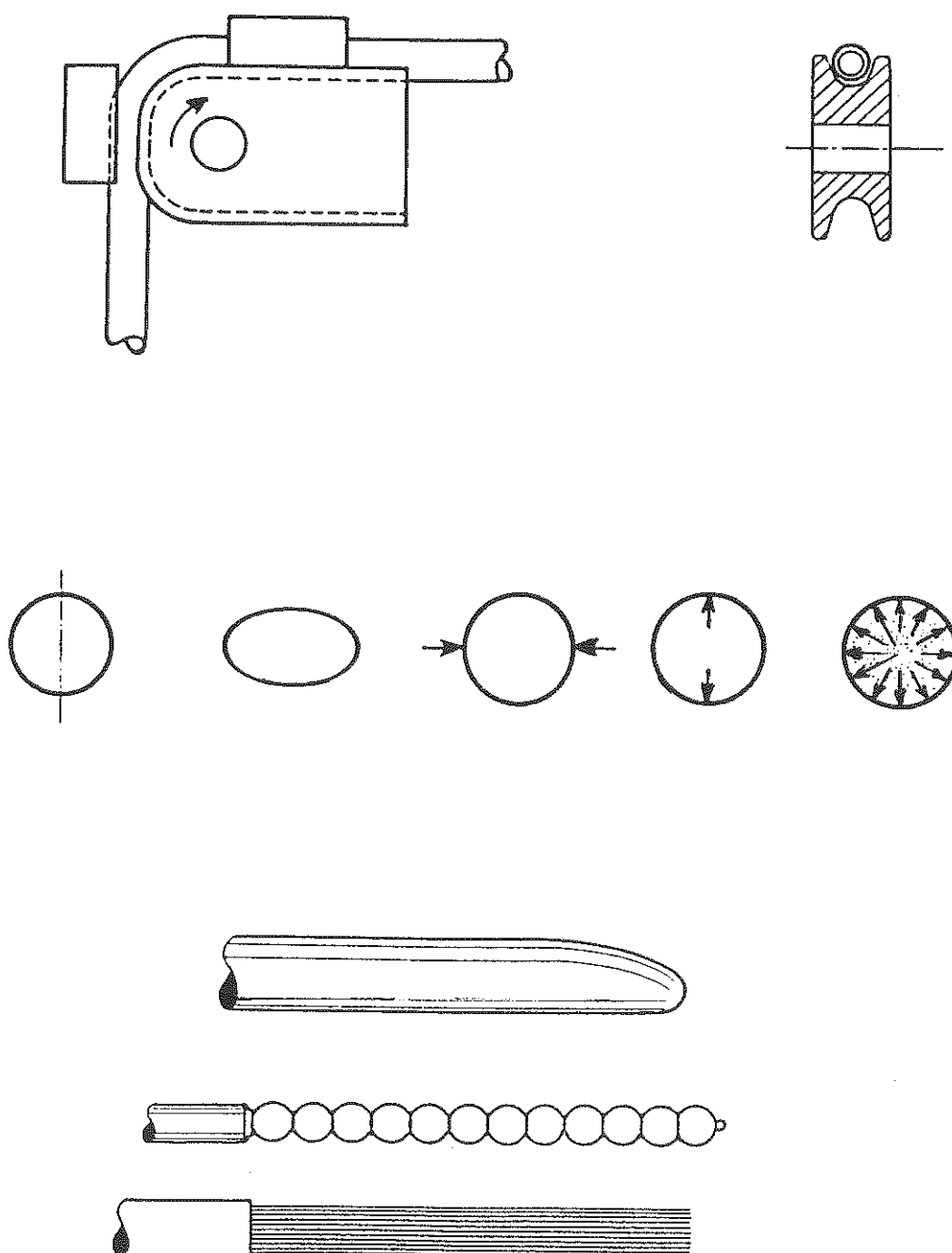


Fig. 202

4.3. Cintrage de profilés

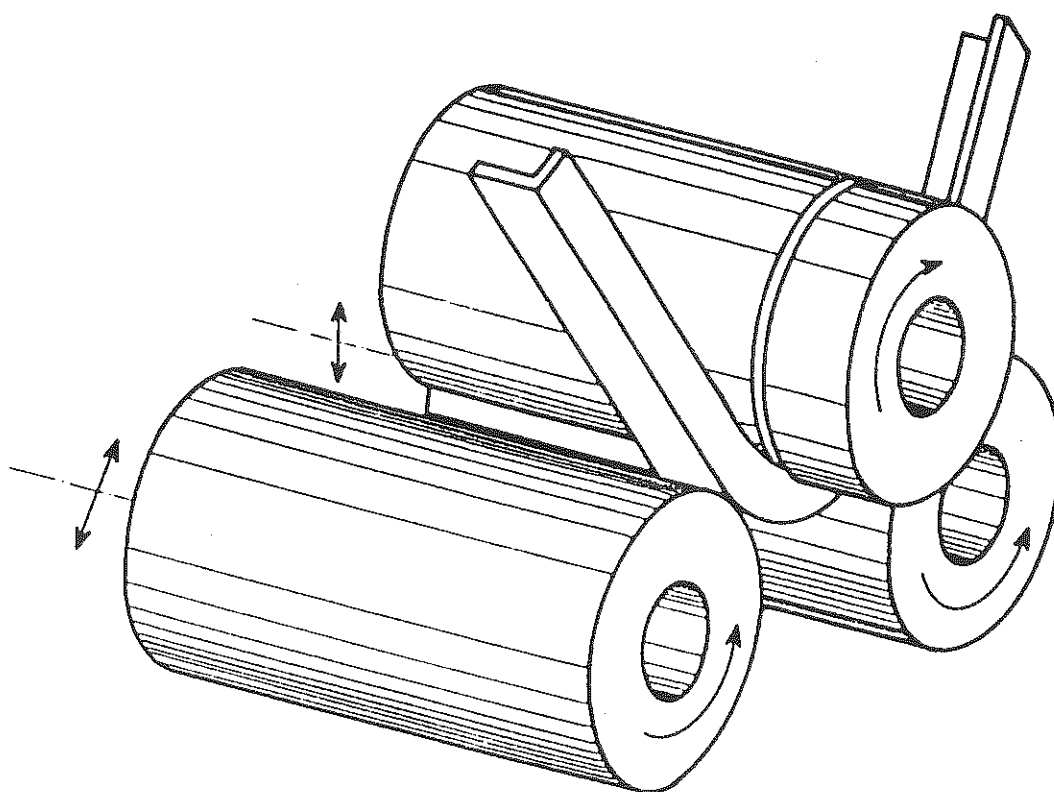


Fig. 203

5. Emboutissage

5.1. L'emboutissage est une technique très utilisée pour obtenir, à partir d'une feuille plane, une feuille creuse. Alors que le pliage et le cintrage ne font intervenir que de la flexion, l'emboutissage implique toujours une déformation *extensionnelle* prépondérante.

Le processus d'emboutissage se réalise à la presse. Il est impératif de pouvoir ressortir le poinçon après le travail, ce qui limite les formes possibles (*formes démoulables*).

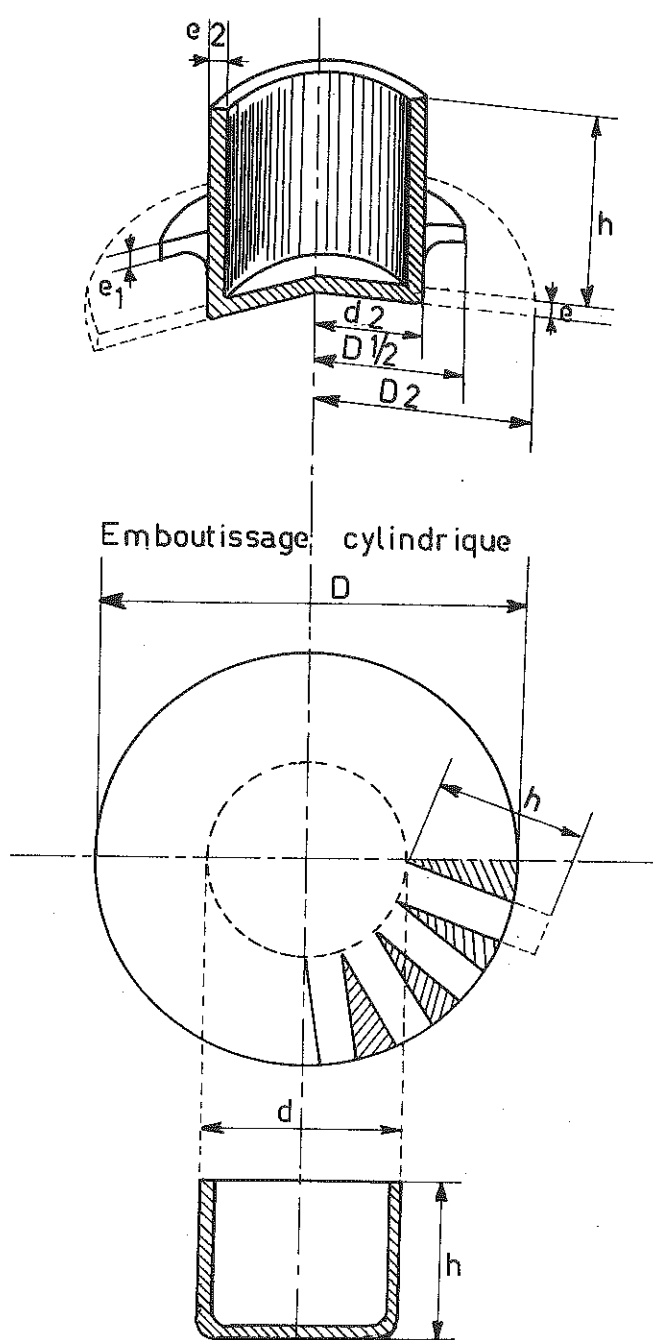


Fig. 204

5.2. Examinons le processus d'emboutissage d'un gobelet. La matière du flan passe progressivement au diamètre du gobelet. Ce faisant, elle doit se contracter circonférentiellement. Il en résulte des contraintes circonférentielles de *compression* qui rendent le flan instable. Pour l'empêcher de voiler, on l'emprisonne en appliquant sur sa surface un *serre-flan* développant une pression p que l'on choisit comme suit :

Matériau du flan	p (MPa)
Ac dx	2,5
Ac inox	2,0
Al	1,2
Laiton	2,0
Duralumin.	1,6

Fig. 205

Ce serre-flan développe des contraintes radiales d'extension. Pour les cas difficiles, on utilise un *jonc* qui retient plus vivement la tôle.

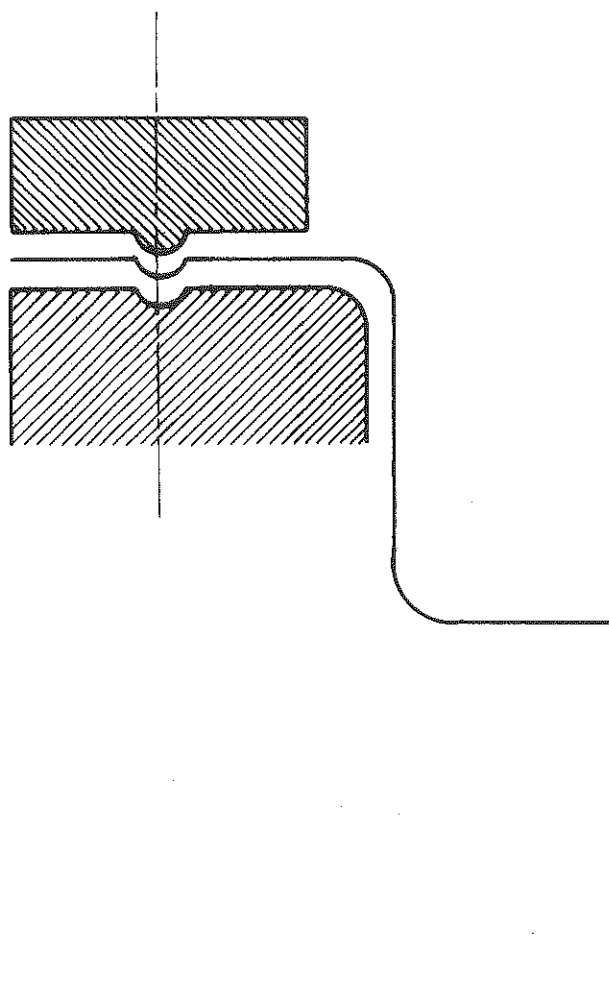


Fig. 206

Tensions radiales de traction

Tensions tangentielles
de compression

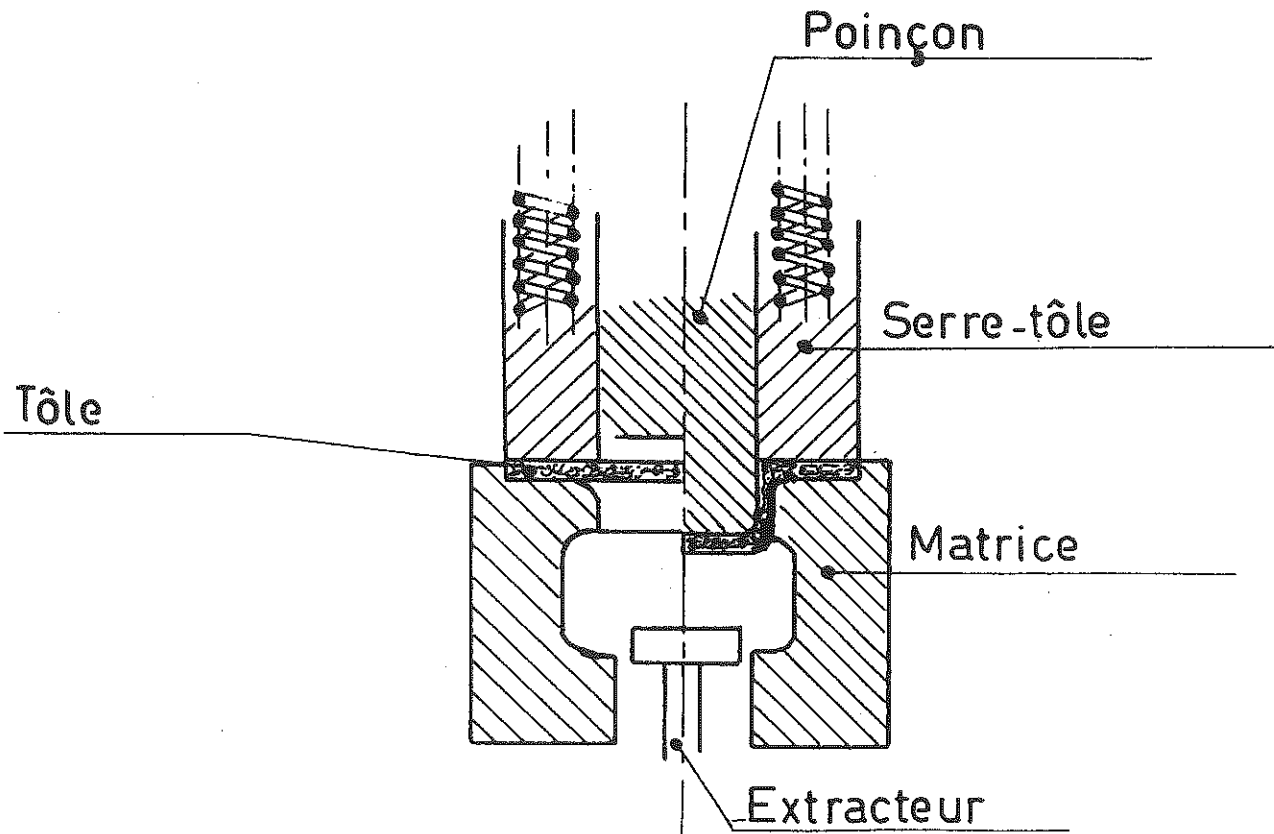
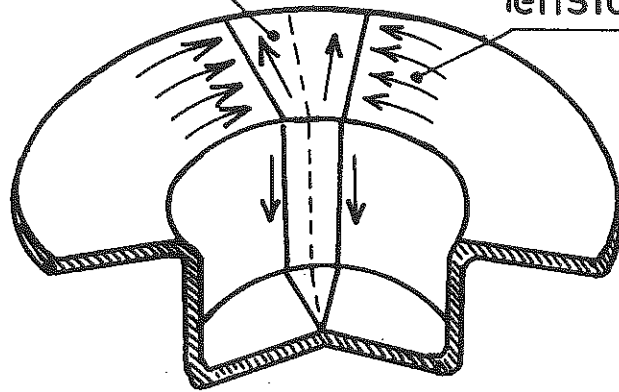


Fig. 207

5.3. Evaluation des efforts

En admettant que l'épaisseur de la tôle reste constante, on a, comme en filage,

$$P = \frac{R_e}{\eta} \ln \frac{D}{d} \cdot Q$$

L'effort de traction se fait à la partie cylindrique, où

$$Q = \pi d e v$$

On obtient donc

$$F = \frac{P}{v} = \frac{1}{\eta} R_e \pi d e \ln \frac{D}{d}$$

En posant

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1,7 R_m}{R_e},$$

on obtient la formule

$$F = 1,7 R_m \pi d e \ln \frac{D}{d}$$

Il est d'usage de noter $m = d/D$. Par ailleurs, la contrainte dans la virole vaut

$$\sigma = \frac{F}{\pi d e} = 1,7 R_m \ln \frac{1}{m}$$

et doit rester inférieure à R_m . On obtient la condition

$$\ln \frac{1}{m} = \frac{1}{1,7},$$

$$m = 0,55$$

ce qui est assez réaliste *pour la première passe*.

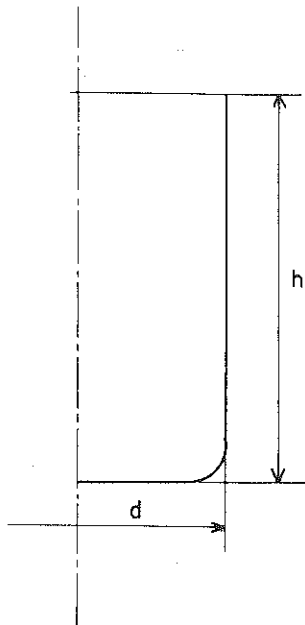


Fig. 208

La surface du flan est égale à celle du gobelet. On a donc

$$\frac{\pi d^2}{4} + \pi dh = \frac{\pi D^2}{4}$$

soit

$$D^2 = d^2 + 4 dh$$

et

$$\frac{1}{m^2} = 1 + 4 \frac{h}{d},$$

ce qui fixe m .

5.5. Rayon de la matrice

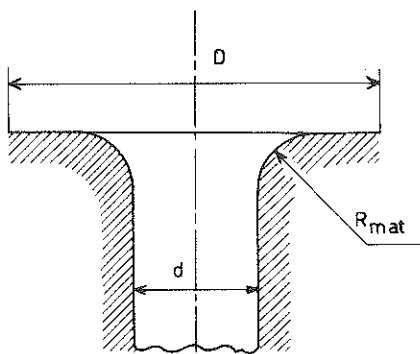


Fig. 209

Il tombe sous le sens qu'un rayon de matrice *mal* entraînerait le poinçonnage de la tôle. En fait, ce rayon doit être supérieur à l'épaisseur e de la tôle. D'autre part, le rayon devra être inférieur à $\frac{D-d}{2}$,

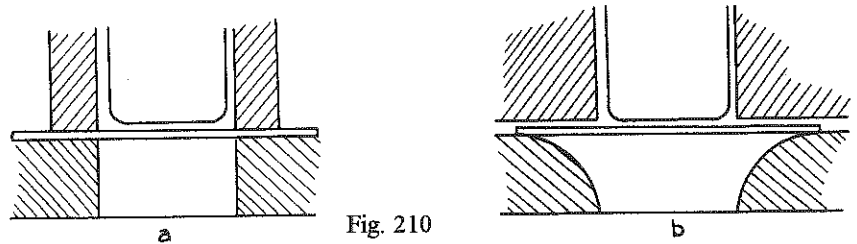


Fig. 210

sans quoi il n'y aura plus de guidage du flan. Le rayon R_{mat} doit donc avoir un ordre de grandeur intermédiaire entre e et $\frac{D-d}{2}$. On est tenté de poser

$$R_{mat} = \sqrt{e \cdot \frac{D-d}{2}} = 0,7 \sqrt{(D-d) e}$$

KACZMAREK préconise la valeur

$$R_{mat} = 0,8 \sqrt{(D-d) e}$$

5.6. Rayon du poinçon

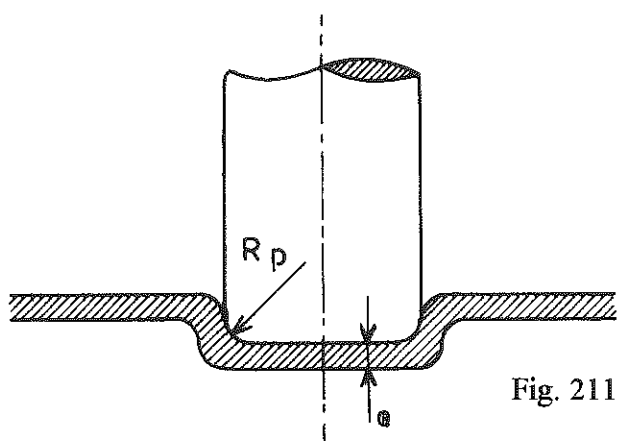


Fig. 211

Si le rayon du poinçon est trop petit, les déformations de flexion à la jonction du fond à la virole seront trop fortes et le fond se détachera (*défonçage*). Grossièrement, on a

$$\varepsilon \approx \frac{(R_p + e) \cdot \left(R_p + \frac{e}{2}\right)}{R_p + \frac{e}{2}} = \frac{\frac{e}{2}}{R_p + \frac{e}{2}} \approx \frac{e}{2R_p}$$

C'est donc le rapport e/R_p qui importe. La bonne pratique est de donner un rayon R_p tel que

$$5 e \leq R_p \leq 10 e.$$

5.7. Jeu entre le poinçon et la matrice

Le jeu *diamétral* doit être

$$j = d_{\text{mat}} - d_{\text{poinçon}} = 2(e + 1,2 \Delta e),$$

où Δe est la tolérance sur l'épaisseur de la tôle.

5.8. Propriétés mécaniques des outils

La matrice, le poinçon et le serre-flan doivent être *durs*. Il faut une dureté $HR_C = 58 \dots 60$.

Les surfaces de travail de la matrice et du serre-flan doivent être *rectifiées et polies*.

5.9. On utilise souvent, pour l'emboutissage, une presse à bielle et manivelle, dont voici la légende :

1. Moteur électrique avec courroie de transmission
2. Volant tournant fou sur la manivelle 3
4. Manchon de transmission du mouvement (embrayage)
5. Coulisseau
6. Bielle
7. Frein pour arrêt rapide après débrayage
8. Commande du manchon

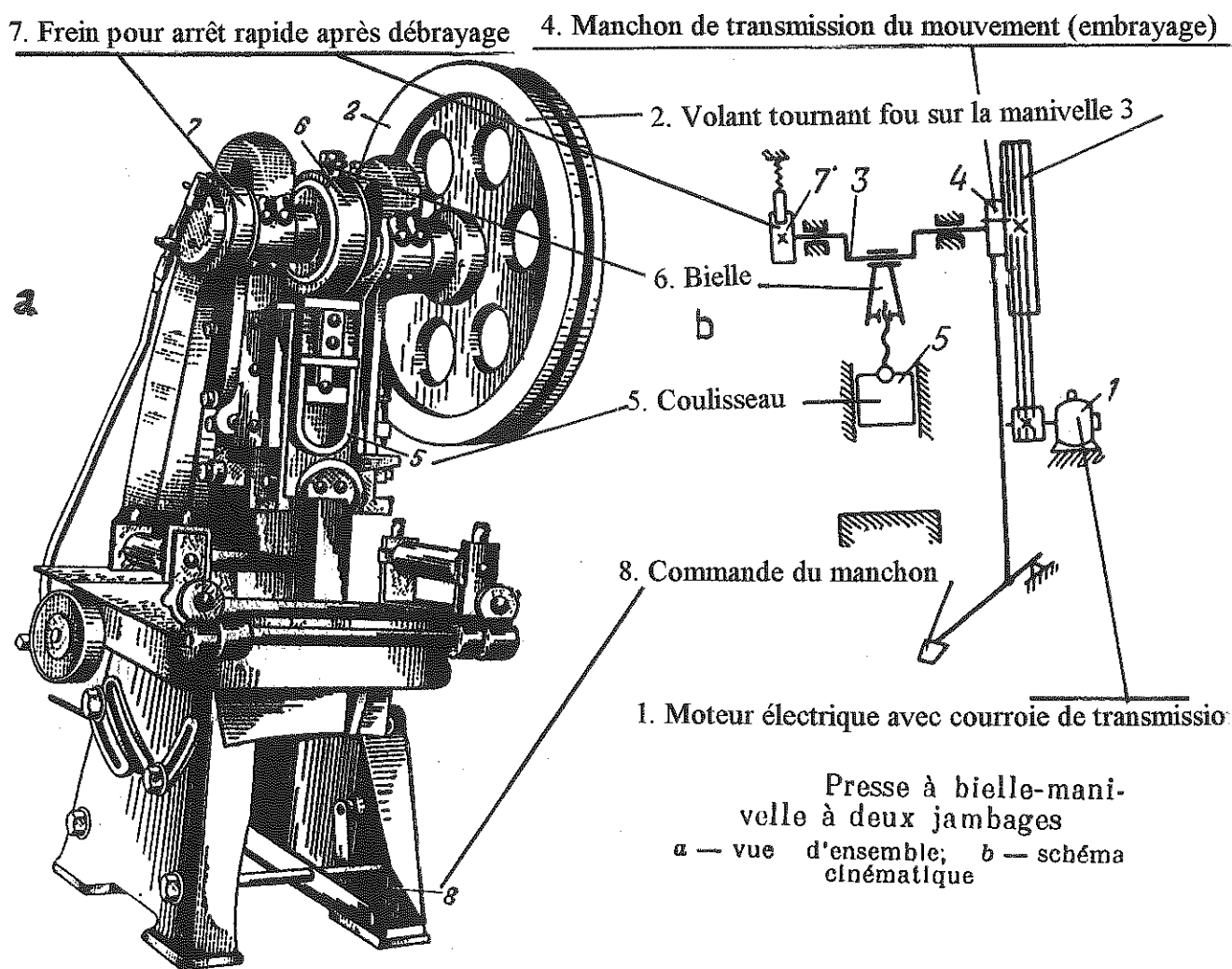
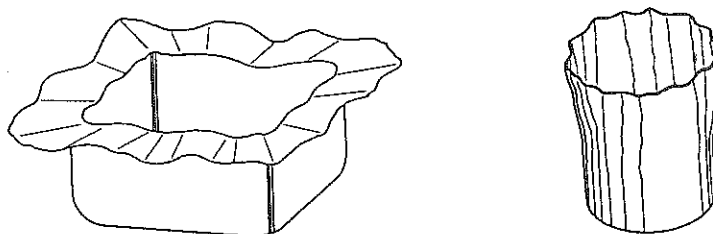


Fig. 212

5.10. Défauts des pièces embouties

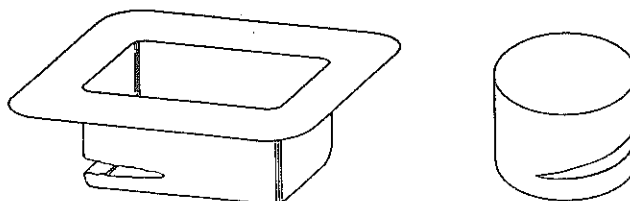
- *Plis* : dus à une épaisseur insuffisante de la tôle, l'absence ou l'insuffisance de serre-flans ou joncs

Fig. 213



- *Défonçage* : • effort trop grand (flan trop large, c'est-à-dire emboutissage trop profond)
• poinçon trop anguleux

Fig. 214



- *Cornes d'emboutissage* : au nombre de 4 en général. Elles proviennent de l'anisotropie de la tôle laminée (fibres). Ces cornes étant inévitables, il faut prévoir un supplément de longueur, à couper

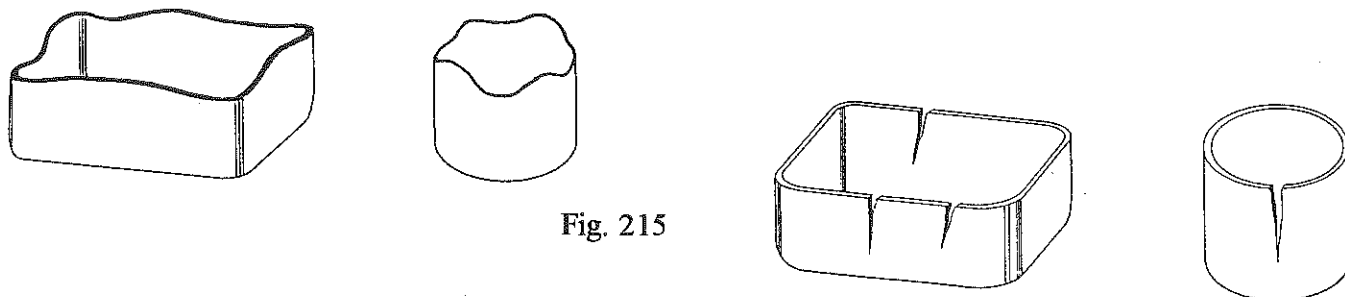


Fig. 215

- *fissures* : mauvais guidage, plis écrasés (figs 215-216).

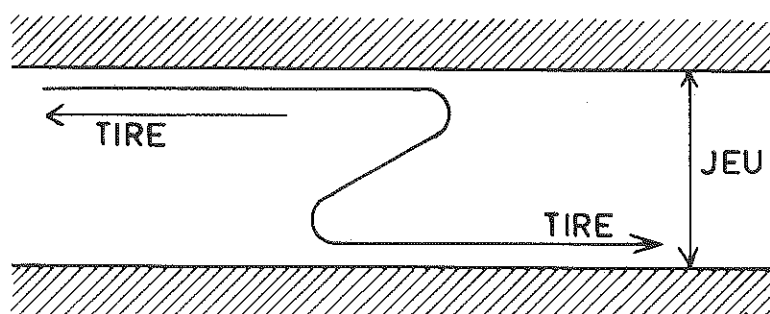


Fig. 216

5.11. Emboutissage cylindrique profond

Un emboutissage trop profond mène au défonçage. Cependant, il est possible d'obtenir des emboutis profonds en faisant plusieurs passes. On limite le rapport $m = d/D$ de chaque passe comme suit :

$m \geq m_1$ pour la première passe (partant d'un plat)

$m \geq m_2$ pour les passes suivantes (partant déjà d'un godet)

Matériau du flan	m_1	m_2
Tôle d'emboutissage ordinaire	0,60	0,80
spéciale	0,55	0,75
Tôle d'Ac inox austénitique	0,51	0,80
ferritique	0,57	0,80
Cu	0,58	0,85
Cu - Zn (laiton)	0,53	0,75
Al recuit	0,50	0,80
Dural recuit	0,55	0,90

Fig. 217

Soit, en moyenne : $\begin{cases} m_1 = 0,55 \\ m_2 = 0,80 \end{cases}$

On peut procéder avec ou sans retournement (fig. 218).

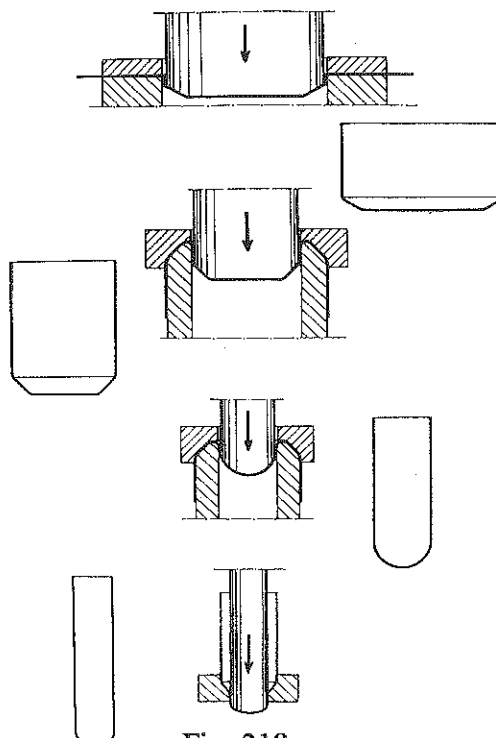


Fig. 218

5.12. Emboutissage conique

L'emboutissage conique est *plus délicat* que l'emboutissage cylindrique, car la pièce n'est pas guidée entre le poinçon et la matrice.

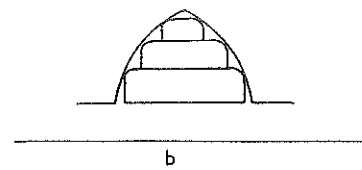
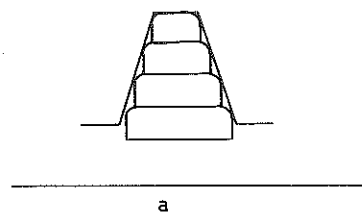
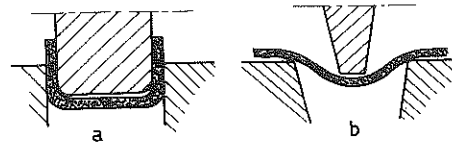
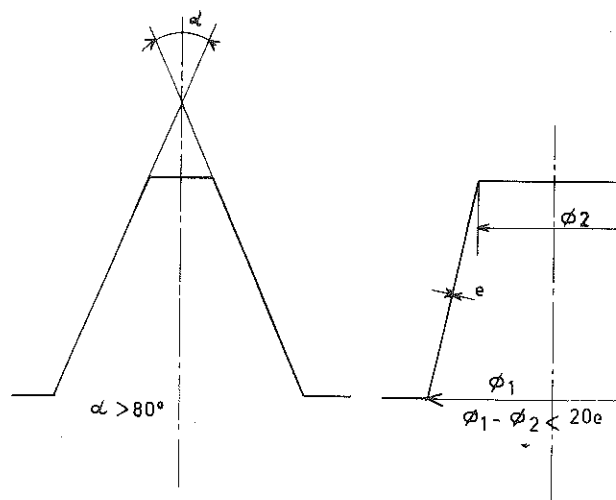


Fig. 219

a) Il existe deux cas extrêmes sans problème



b) Dans les autres cas, il faut emboutir *par gradins cylindriques*, en se servant des coefficients m_1 et m_2 , puis donner un *coup* de poinçon conique pour calibrer le cône (fig. 219).

Fig. 220

5.13. Pièces hémisphériques

a) On emboutit les pièces hémisphériques *en 1 passe* si $d/e < 200$

b) Si $d/e < 200$,

- 1ère passe avec un poinçon =
 $d_1 = 2 (R \cos 45^\circ + 10 e)$

- passes suivantes en augmentant d de $20 e$ chaque fois
 (on n'emboutit plus que sur les bords !)

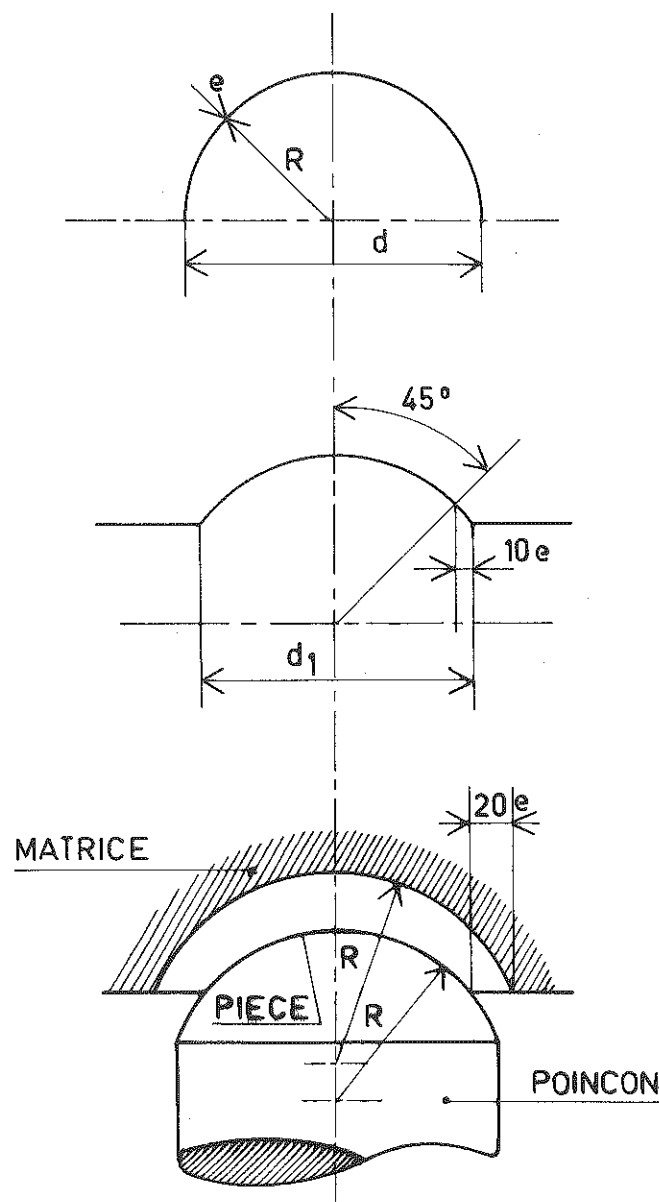


Fig. 221

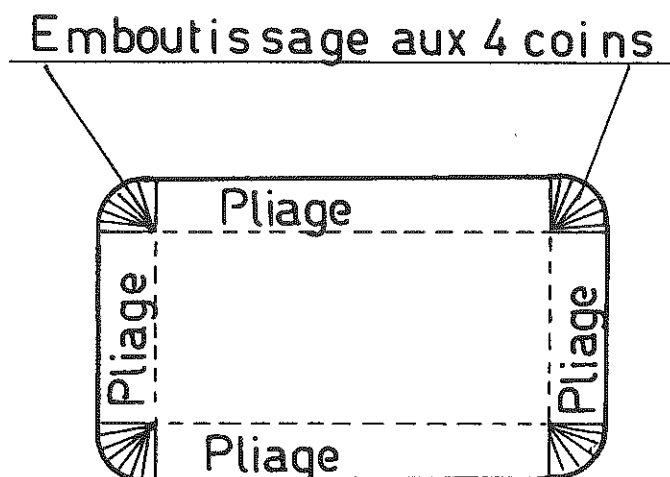
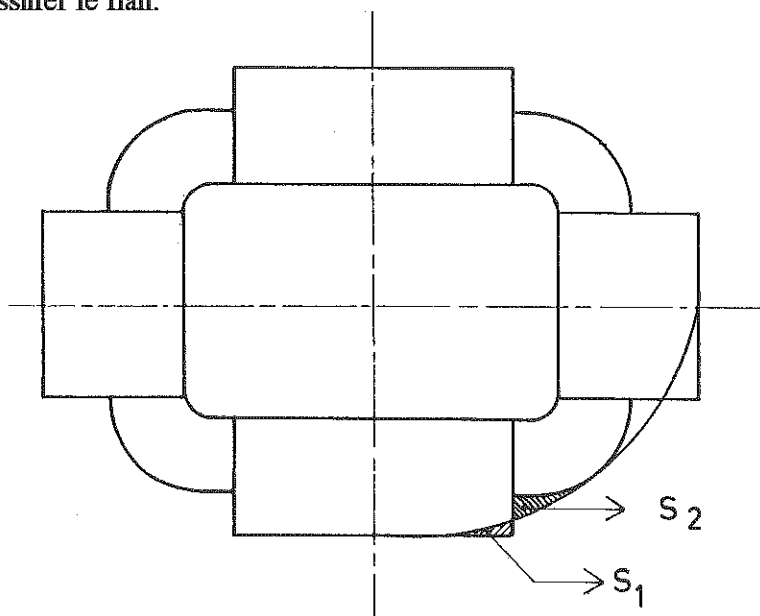


Fig. 222

5.14. Pièces prismatiques

C'est le cas des éviers. En dehors des quatre coins, il s'agit d'un pliage. Le problème est de dessiner le flan.



La solution en traits pleins tient compte, zone par zone, de la conservation de la surface. On corrige ce dessin de manière à obtenir un flan régulier. Les corrections doivent être faites à enlever d'un côté (S_1) autant que l'on rajoute de l'autre (S_2).

Le flan pratique ainsi déterminé doit être *essayé* et corrigé en fonction des essais.

Fig. 223

6. Repoussage au tour

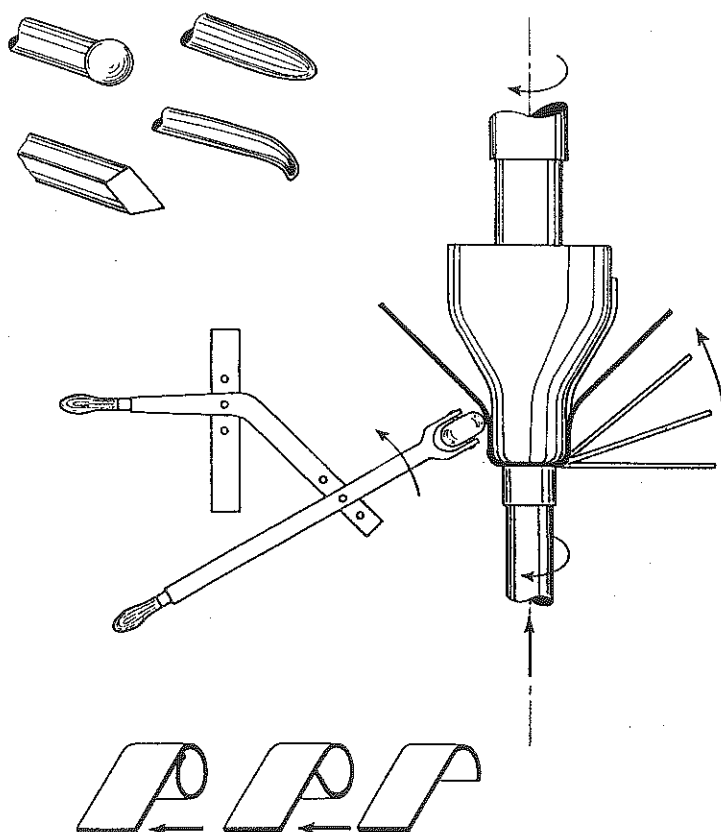


Fig. 224

6.1. Le repoussage au tour permet d'obtenir des formes compliquées de révolution à partir d'un flan plat. Le flan étant serré sur un mandrin par une poupée rotative, on couche le métal avec un galet :

"Le travail est dur, il faut un ouvrier très robuste, nerveux et habile, qui s'arc-boute en se soutenant les reins par une large ceinture de cuir attachée au montant du support".

(J. NAPPEE, *Travail mécanique des tôles*, Béranger, Lg et Paris, 1935)

Contrairement à l'emboutissage, le repoussage au tour permet de réaliser des pièces non démoulables (fig. 225).

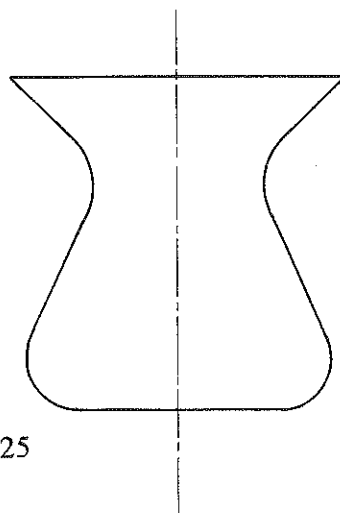


Fig. 225

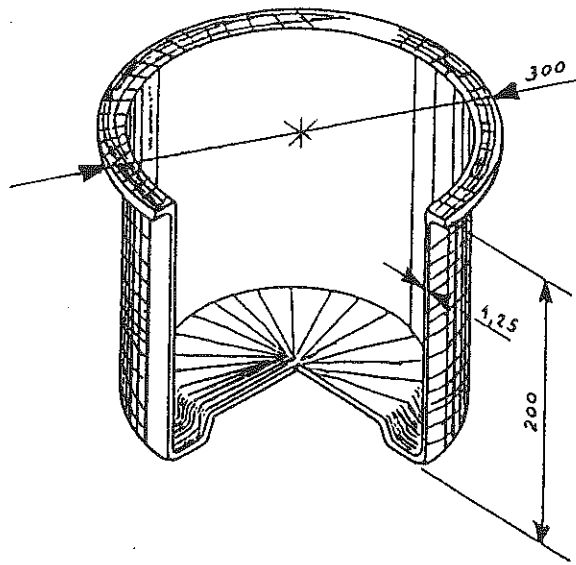


Fig. 226

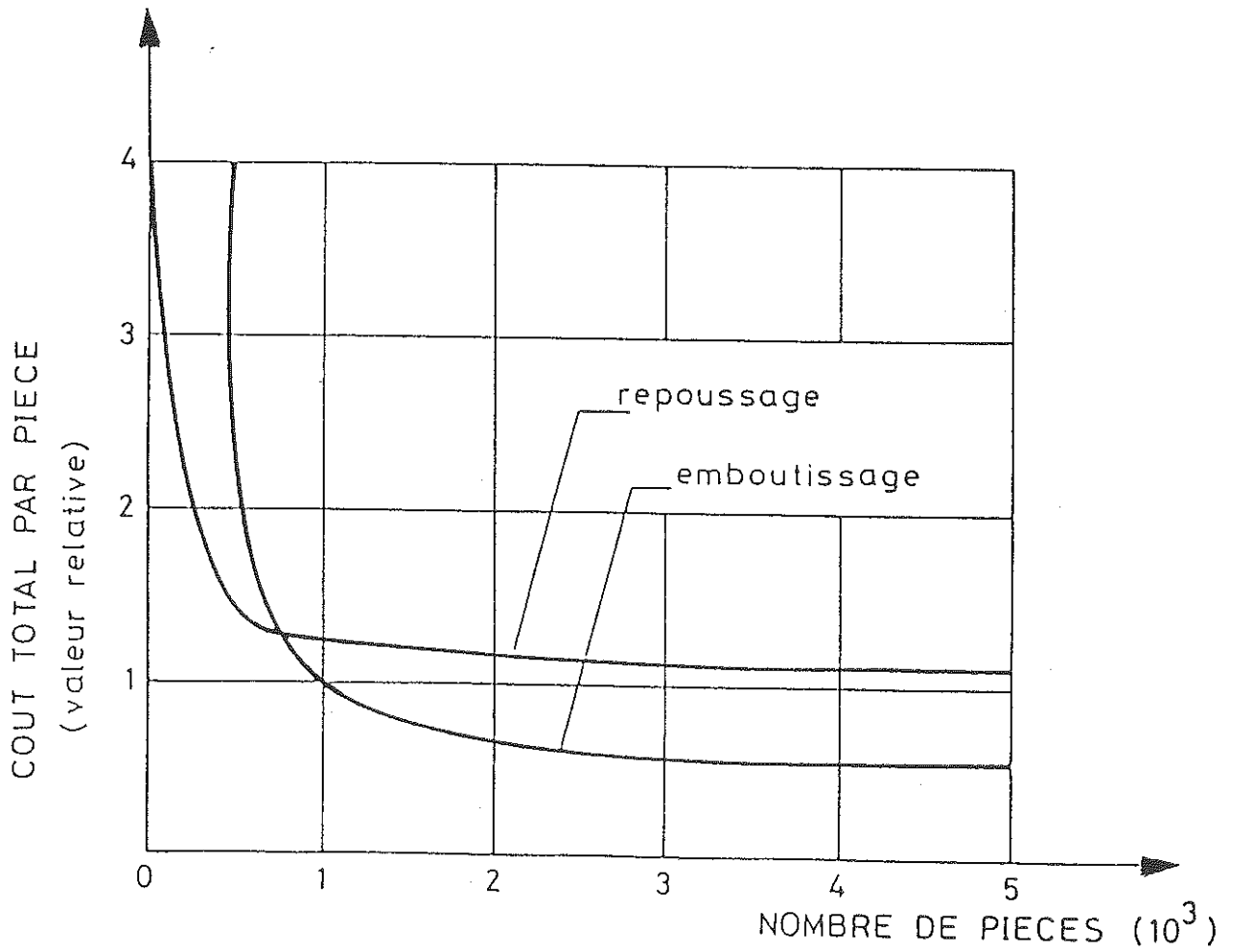


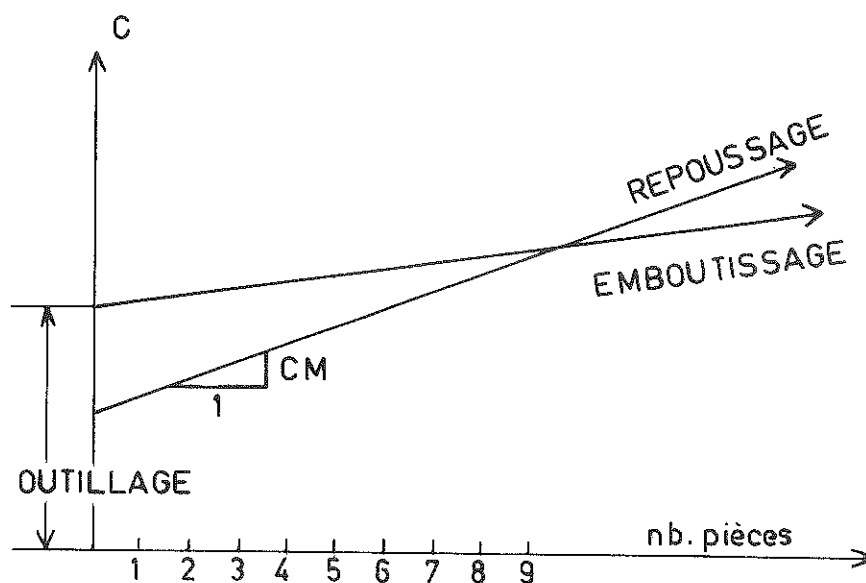
Fig. 227

6.2. Dans le cas où la pièce peut également être emboutie, quel est le procédé le plus économique ? Nous supposons que l'on dispose d'un tour à repousser et d'une presse à emboutir. On a alors les frais suivants :

	Emboutissage	Repoussage
outillage	poinçon + matrice + serre-flan + extracteur + guides cher	mandrin + poupée en bois pas cher
main d'oeuvre	peu	beaucoup

Fig. 228

Les frais totaux suivent donc les courbes suivantes



$$C_{\text{tot}} = C_o + CM.n$$

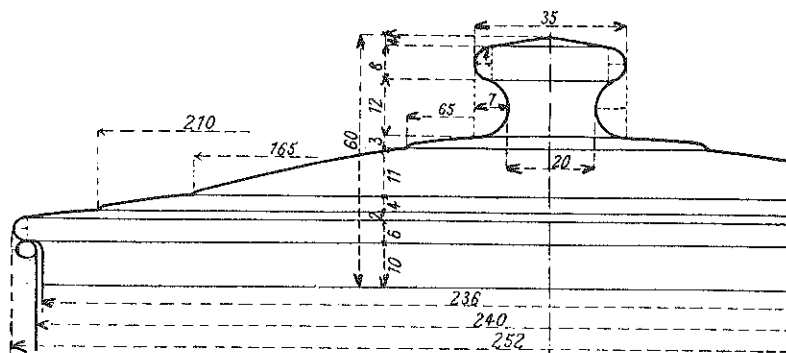
\downarrow \downarrow
 outillage coût marginal

Fig. 229

$$C_{1 \text{ pièce}} = \frac{C_{\text{tot}}}{n} = \frac{C_o}{n} + CM$$

Le repoussage est moins cher pour les petites séries, l'emboutissage plus économique pour les grandes.

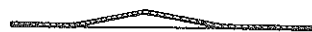
6.3. Gamme de fabrication d'un couvercle à bouton



Couvercle repoussé de 24 à bouton, flan diam. 295, épaisseur 5/10, poids 266 g.

Fig. 230

1^{re} Opération : Centrage du disque à la presse.



Repoussage du couvercle (1^{re} opération).

2^o Opération : Repoussage du couvercle (1^{re} passe).

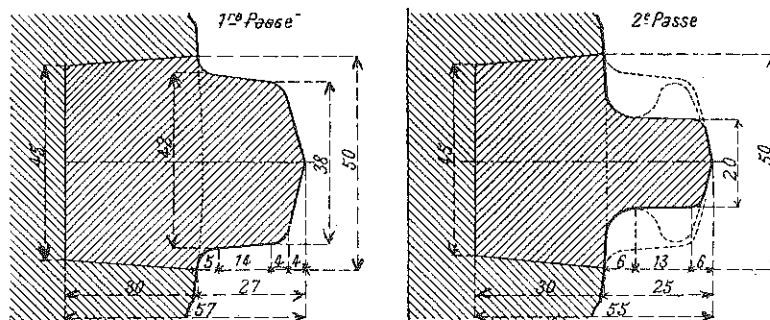


Fig. 231

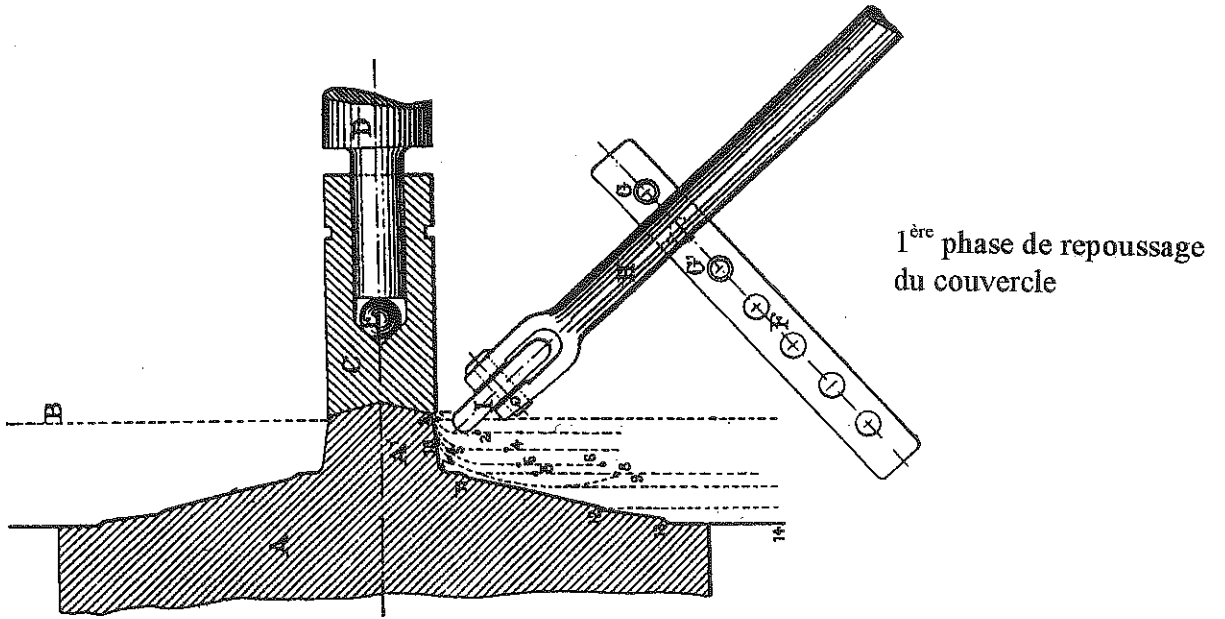
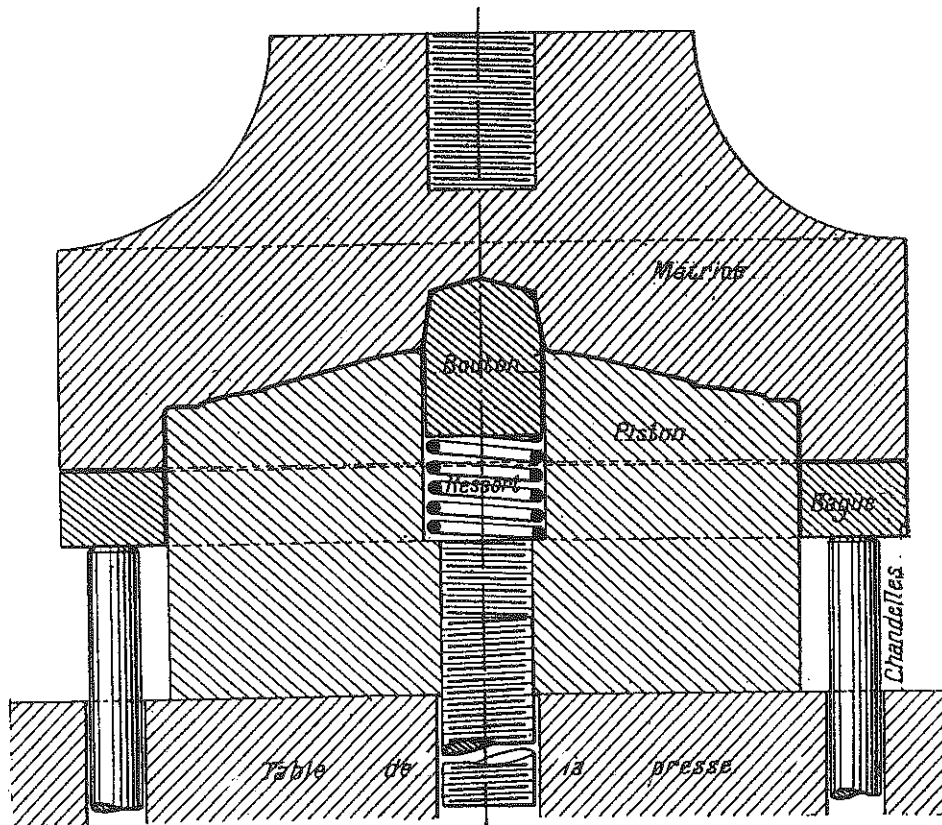


Fig. 232

3^{ème} opération : Emboutissage du drageoir du couvercle.



Outil d'emboutissage du drageoir du couvercle.

Fig. 233

5° Opération : Finition du bouton (2° passe de repoussage.)

6° Opération : Rognage du drageoir.

7° Opération : Rétreignage du drageoir

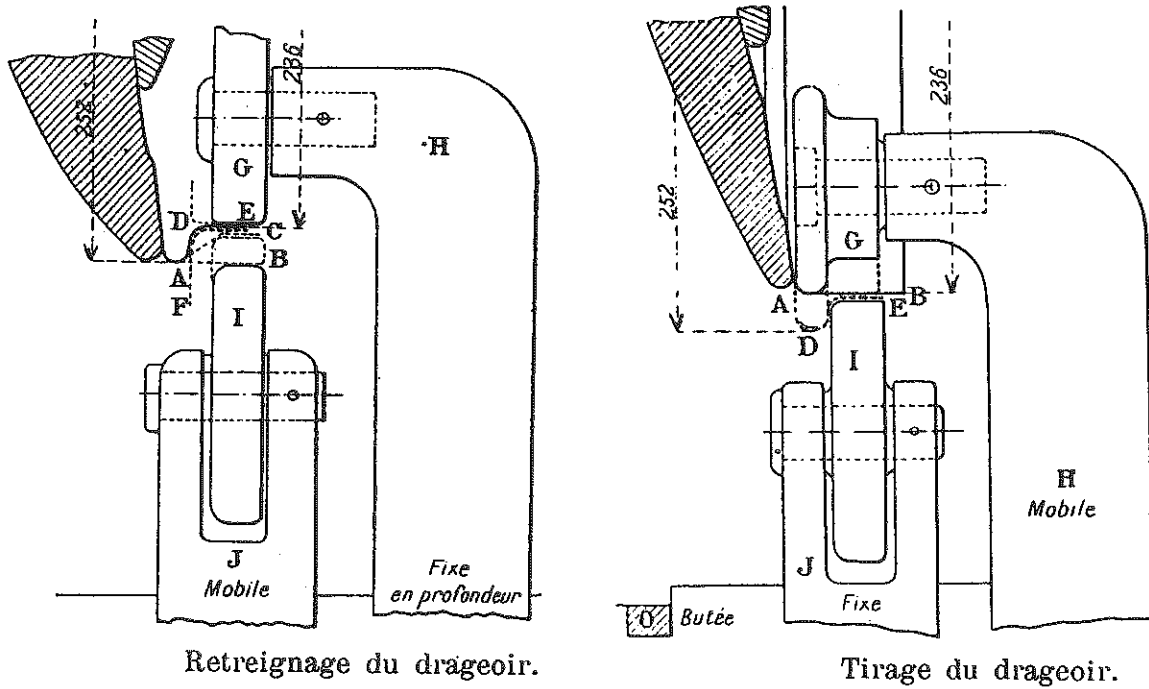
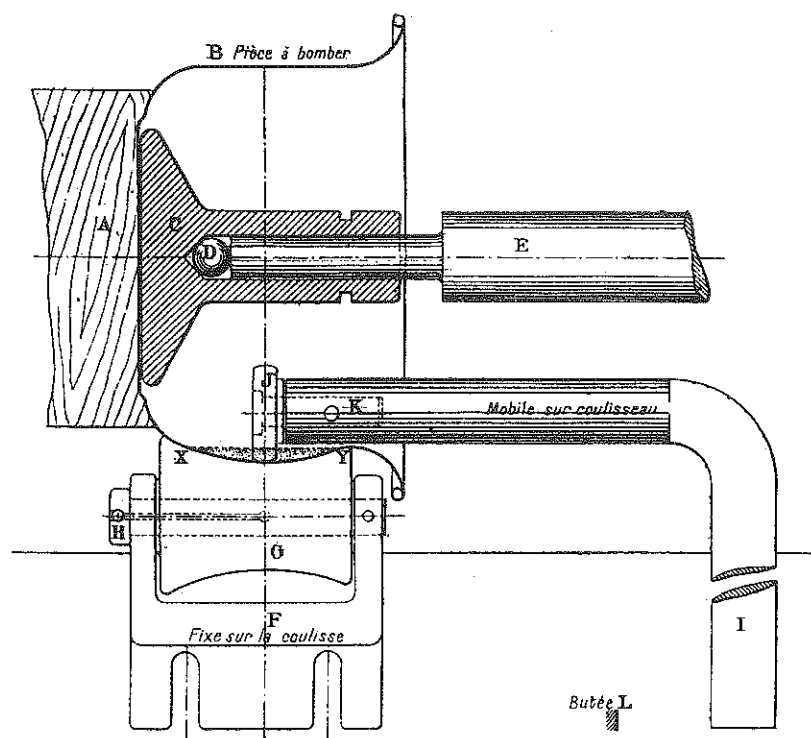


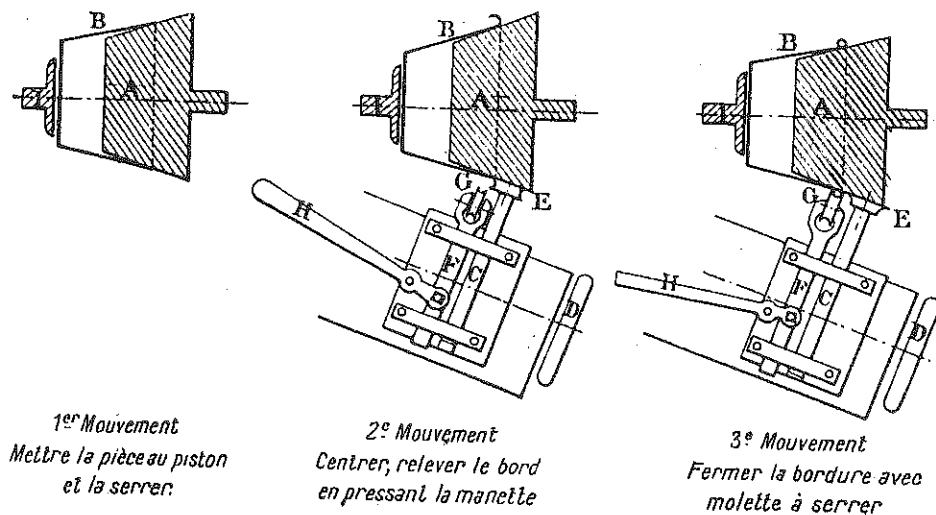
Fig. 234

6.4. Le repoussage est très utilisé en *casserie* (casseroles, voir supplément du Littré). On voit ici comment obtenir une casserole bombée à partir d'une casserole droite emboutie.



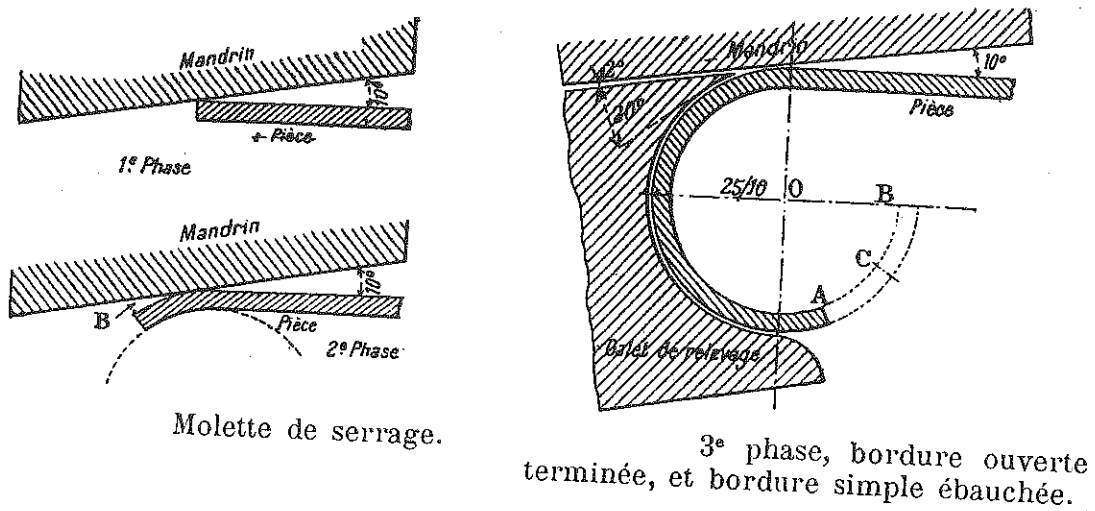
Bombage d'un ustensile embouti.

6.5. L'opération ci-contre s'appelle *bordage*. On notera que le mandrin a un angle plus grand que celui de la pièce, ce qui permet d'introduire le galet de relevage.



Bordage simple fermé.

Fig. 236



Molette de serrage.

Fig. 237

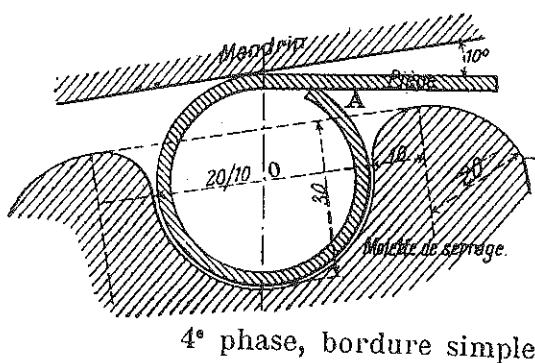


Fig. 238

6.6. Pour les tôles planes, le bordage peut également être réalisé à la presse (J. WOODWORTH, *Découpage, matriçage, poinçonnage et emboutissage*, Dunod, 1920).

Ce procédé permet de faire des *charnières* (permanentes)

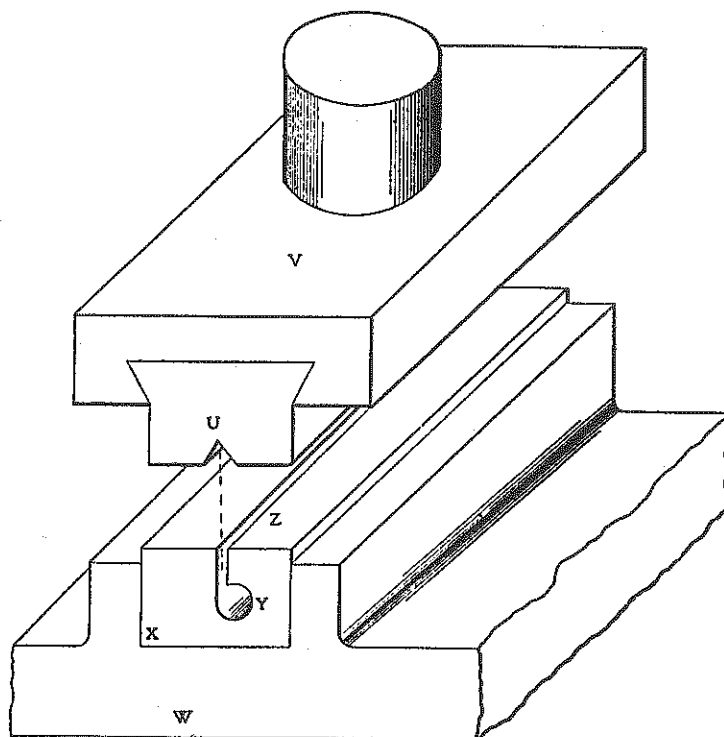


FIG. 31.

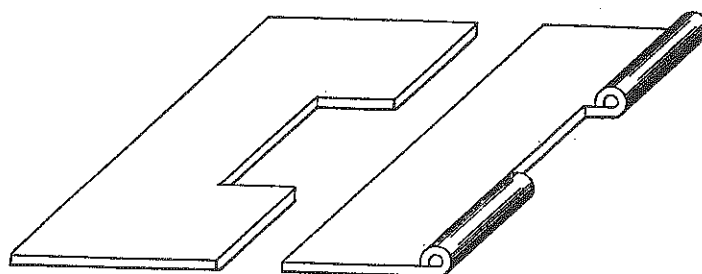
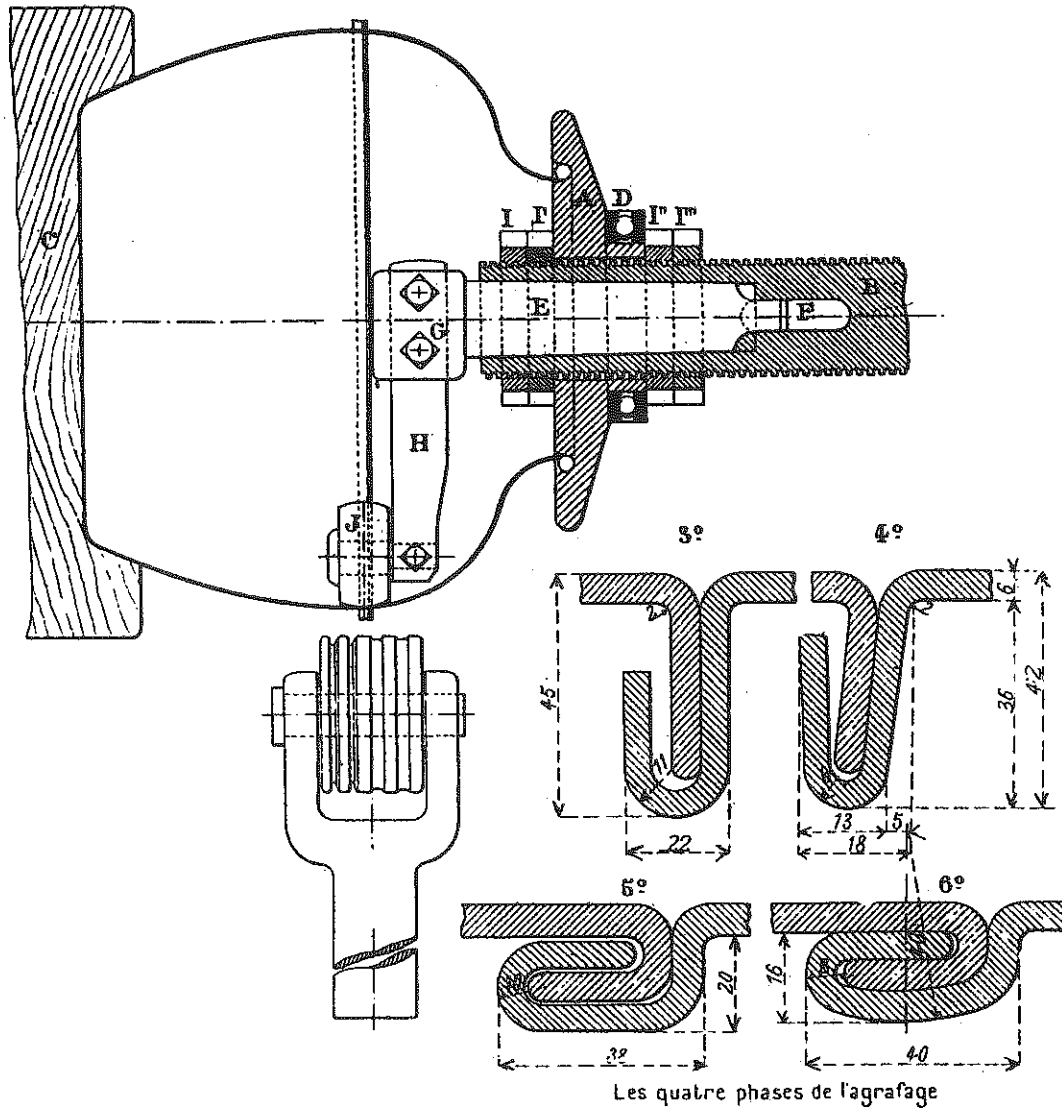


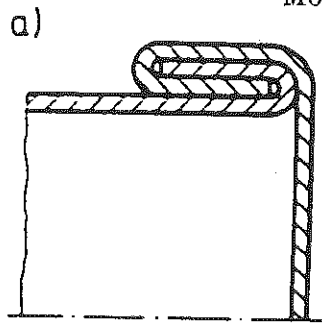
FIG. 32. — Flanc avant et après le bordage.

7. Agrafage

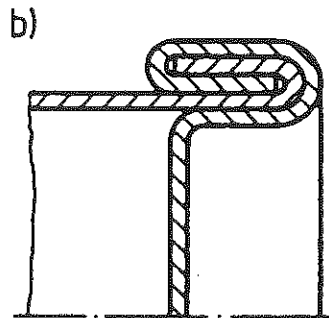
L'agrafage est un procédé d'assemblage par pliage. On distingue *l'agrafage simple* et *l'agrafage double* ou *sertissage*. Ce dernier procédé est utilisé dans la fabrication des boîtes à conserve, pour assembler le couvercle à la virole.



Montage d'ensemble pour tout agrafage.



agrafage simple



agrafage double ou *sertissage*
(couvercles de boîtes à
conserves)

Fig. 240

8. Formage à haute énergie

Ce procédé permet d'obtenir des formes difficiles à réaliser à la presse. Une charge d'explosifs est placée dans l'eau où baigne la pièce. L'onde de choc met la pièce à forme. De plus, il se forme une bulle de gaz dont l'énergie cinétique empêche le retour élastique.

L'outillage est de coût réduit, mais le procédé est lent. On peut utiliser ce procédé pour de très grandes pièces, allant jusqu'à $\varnothing = 4$ m, $e = 100$ mm.

Dans les très petites séries, la virole n'est pas récupérée. Elle est détruite par l'explosion.

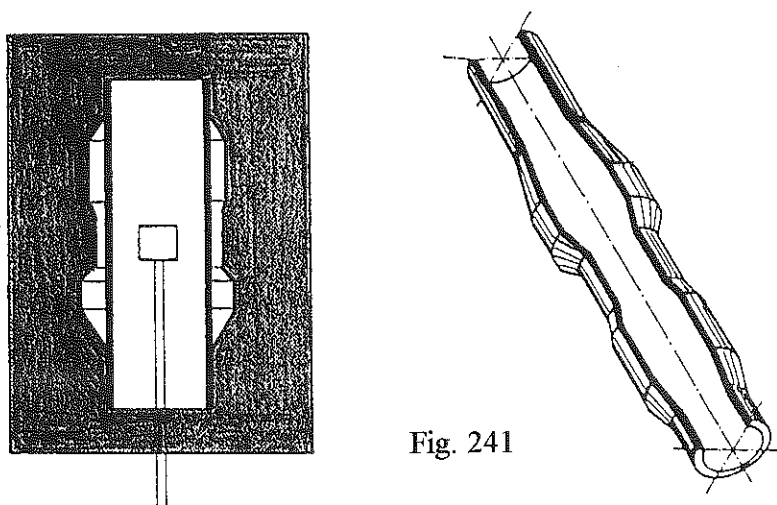


Fig. 241

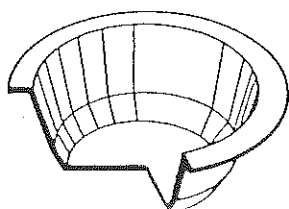
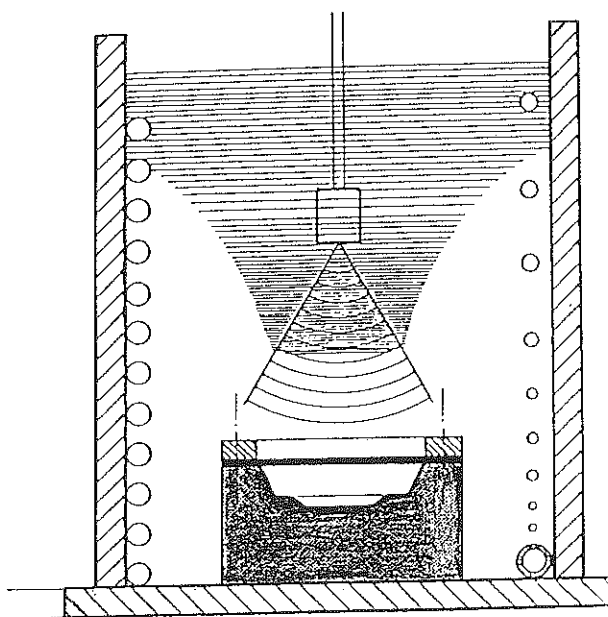


Fig. 242

Bibliographie - Métaux en feuilles

1. E. KACZMAREK : *Pratique des travaux à la presse*. Dunod, Paris, 1964.
2. W. KOENIG : *Fertigungsverfahren - Band 5 : Blechumformung*. VDI, Düsseldorf, 1986.
3. J. NAPPEE : *Travail mécanique des tôles*. Béranger, Paris et Liège, 1935.
4. G. OEHLER-KAISER : *Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge*. Springer, Berlin, 1966.
5. R. QUATREMER : *Déformation plastique des tôles*. Delagrave, 1981.
6. J. WOODWORTH : *Découpage, matricage, poinçonnage et emboutissage*. Dunod, Paris, 1920.

6. SOUDAGE, BRASAGE & OXYCOUPAGE

Soudage, brasage, oxycoupage

1. Le soudage est un assemblage par fusion locale et apport éventuel de métal fondu. Le métal de base et le métal d'apport doivent se mélanger intimement sur une certaine zone de pénétration. Pour souder, il faut donc une source de chaleur aussi concentrée que possible.

Un des problèmes du soudage est d'éviter l'oxydation du métal. En effet, à haute température, le fer a une très grande affinité pour l'oxygène.

2. Soudage au chalumeau

2.1. La source de chaleur est une flamme. Une comparaison de différents gaz possibles montre que la température la plus élevée est obtenue avec l'acétylène C_2H_2 , pour une proportion d'environ 1,2 volumes d' O_2 pour un volume de C_2H_2 .

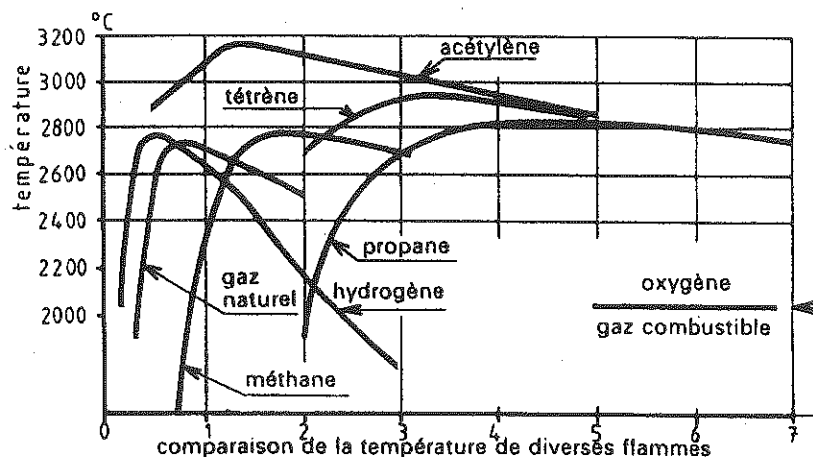


Fig. 243

2.2. Examen de la flamme

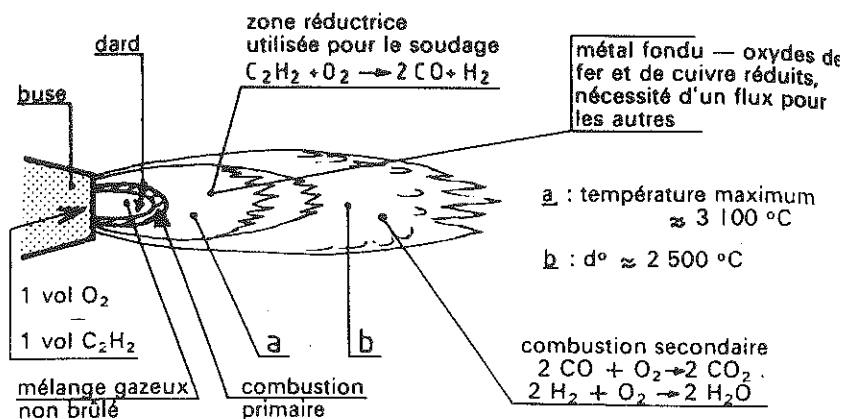


Fig. 244

- Dans le dard (zone bleue), les gaz s'échauffent
- Zone lumineuse de *combustion primaire* (incomplète)

$$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{H}_2$$

Cette combustion est très exothermique. La zone qui suit est *réductrice* (présence de CO) et très chaude ($\approx 3100^\circ\text{C}$). C'est cette zone qui sert au soudage.

- *Panache* : combustion secondaire

$$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$$

$$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$$

La température y est plus faible ($\approx 2500^\circ\text{C}$).

On notera que l'acétylène est le seul gaz pour lequel la formation réductrice $2\text{CO} + \text{H}_2$ est *stable*. C'est donc le seul gaz qui puisse être utilisé sans désoxydant.

2.3. Chalumeau (figure)

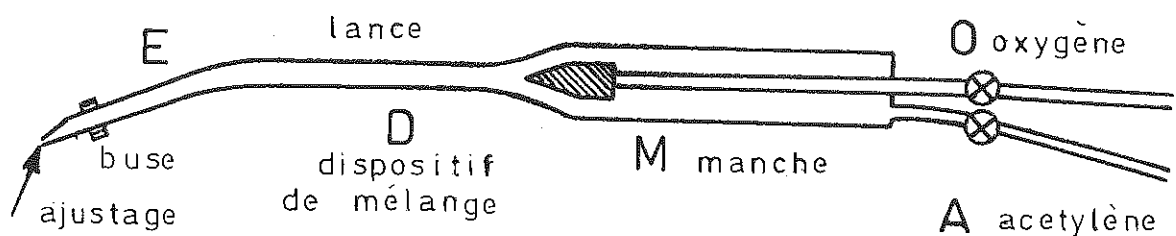


Fig. 245

2.4. Soudage à gauche et soudage à droite

a) *Le soudage à gauche* convient le mieux pour les tôles de faible épaisseur ($e < 5$ mm). Le bain de fusion est en effet peu important et il se solidifie rapidement.

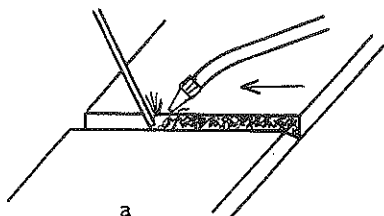


Fig. 246

b) *Le soudage à droite* s'impose pour les fortes tôles ($e \geq 5$ mm), car le bain de fusion, important, se solidifie lentement et risquerait, en soudage à gauche, de s'écouler.

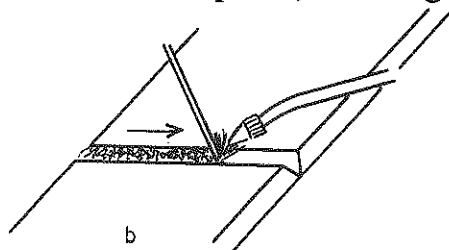


Fig. 247

2.5. Diamètre de la baguette d'apport : $d \approx \frac{e}{2} + 1$ mm

e = épaisseur de la tôle

2.6. Contraintes résiduelles : Le retrait du métal fondu provoque inévitablement des contraintes résiduelles ou des déformations de retrait.

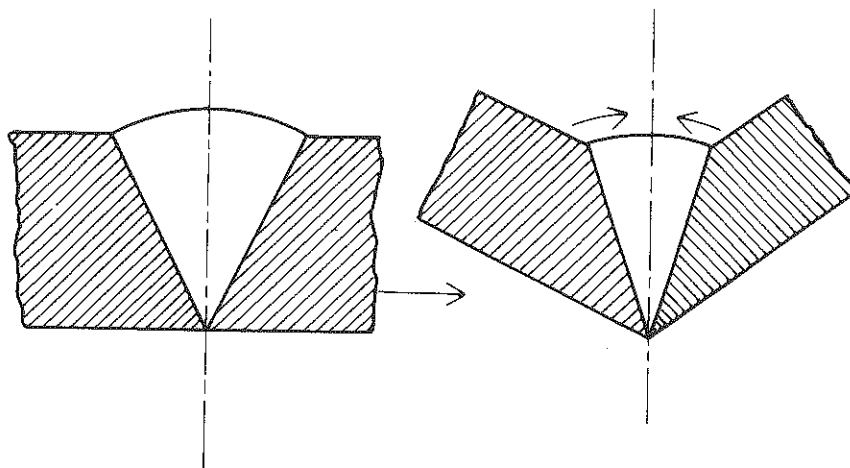


Fig. 248

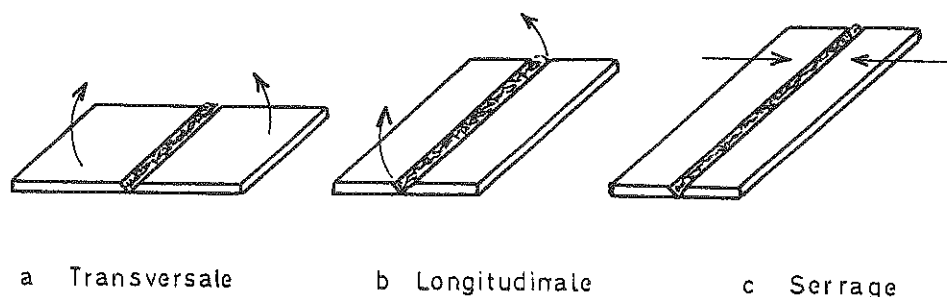


Fig. 249

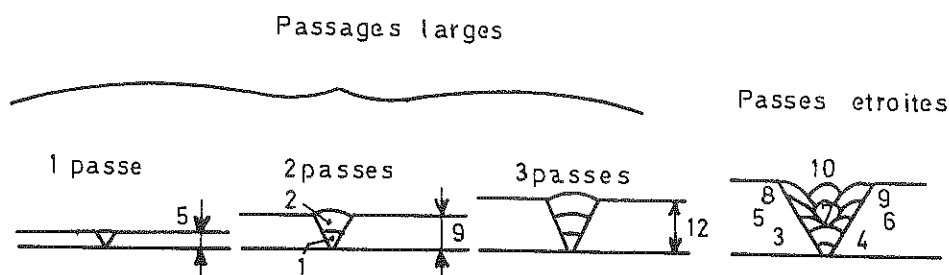


Fig. 250

Ces contraintes peuvent être *très dangereuses* et ont été responsables de nombreux accidents (ponts du Canal Albert, Liberty Ships).

Une *solution partielle* consiste à faire des cordons plus petits, en plusieurs passes.

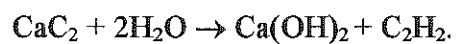
2.7. Stockage des gaz

a) L'*oxygène* se vend en bonbonnes à 200 bar. Une bouteille fait 10 m³ N).

b) L'*acétylène* est difficile à comprimer : *au-delà de 2 bar*, il tend à *exploser*. Mais il se dissout très bien dans l'acétone (l'acétone dissout 25 fois son volume de C₂H₂ pour chaque bar appliqué). La pression du mélange ne peut dépasser 17 bar, ce qui correspond à 6m³N par bouteille (la bouteille tient donc un peu moins longtemps que celle d'oxygène). La bouteille est garnie de matière poreuse (charbon de bois) qui absorbe et stabilise la solution. *Il ne faut jamais coucher les bonbonnes d'acétylène, pour éviter l'écoulement de l'acétone.*

2.8. Production directe de l'acétylène

Certains ateliers de soudure utilisent un générateur d'acétylène, qui fonctionne suivant la réaction



identique à celle de la lampe à carbure utilisée en spéléologie et, jadis, pour les phares d'automobiles (cf. Arsène Lupin).

3. Soudage à l'arc manuel

3.1. *L'arc* est un flux continu d'électrons accompagné d'ionisation, lumière et chaleur. L'anode (+), sur laquelle atterrissent les électrons, est un peu plus chaude que la cathode.

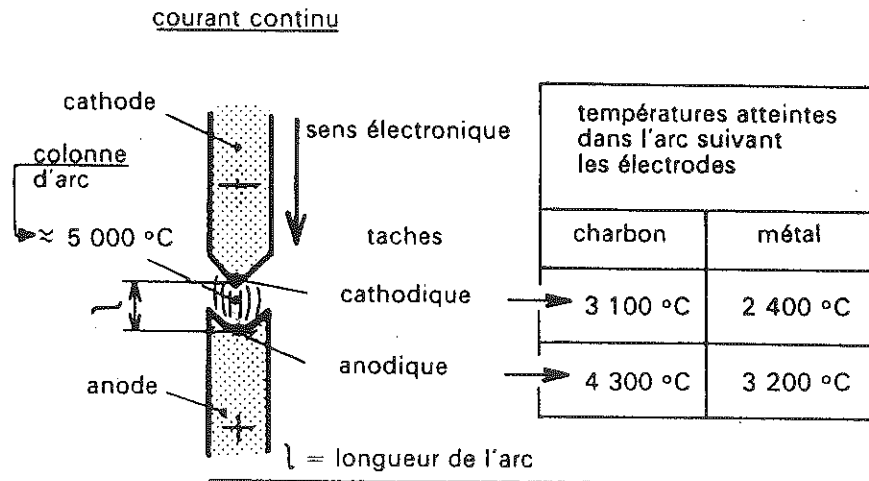
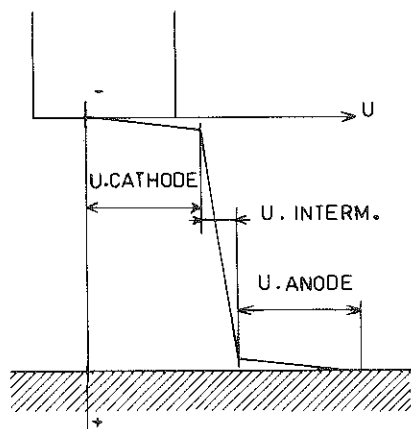


Fig. 251

3.2. Caractéristique électrique de l'arc



On observe une variation très rapide de la tension au voisinage des deux électrodes, puis une variation plus lente dans le corps de l'arc.

La caractéristique de l'arc est fortement non linéaire. La valeur U_s pour $I = 0$ est particulièrement importante et s'appelle *tension d'amorçage*.

Fig. 252

Après le minimum, on a une expression approchée

$$U \approx U_0 + RI,$$

où R est à peu près proportionnel à la longueur de l'arc :

$$R \approx R_0 \frac{l}{l_0}$$

Pour un fonctionnement normal, on utilise souvent la loi normalisée

$$\left(\frac{U}{V}\right) \approx 20 + 0,04 \left(\frac{I}{A}\right) \quad (U \text{ en V, } I \text{ en A})$$

Le courant de service est assez grand. On peut admettre la relation approchée

$$\left(\frac{I}{A}\right) = 50 \left(\left(\frac{d}{mm}\right) - 1 \right) \quad I \text{ en A}$$

d = diam. électrode en mm

Pour des électrodes allant de 2 mm à 6,3 mm de diamètre, cela donne $I = 50 \dots 265$ A. Les électrodes à haut rendement travaillent avec des intensités plus grandes encore.

3.3. Constante de fusion d'une électrode. Le débit G d'électrode est relié au courant par la relation

$$G = a I,$$

où a est la *constante de fusion* de l'électrode. Elle est de l'ordre de

$$a = 0,12 \dots 0,20 \text{ g/A/min}$$

3.4. Caractéristique du générateur de tension

- La *tension à vide* U_v du générateur doit être supérieur à la tension d'amorçage de l'arc
- Le *courant de court-circuit* I_{cc} du générateur doit être raisonnable, car on fait démarrer l'arc en joignant les électrodes. Cette manoeuvre ne peut pas endommager le générateur.
- Le *point de fonctionnement* se détermine en exprimant que le générateur et l'arc ont même tension et même courant.

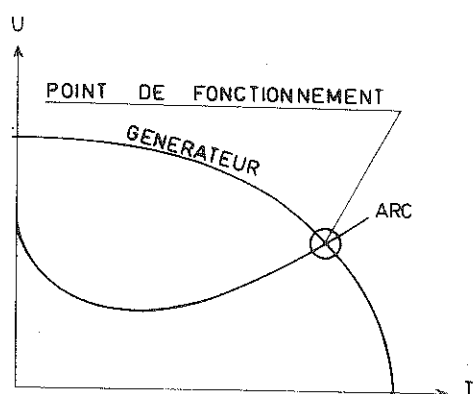
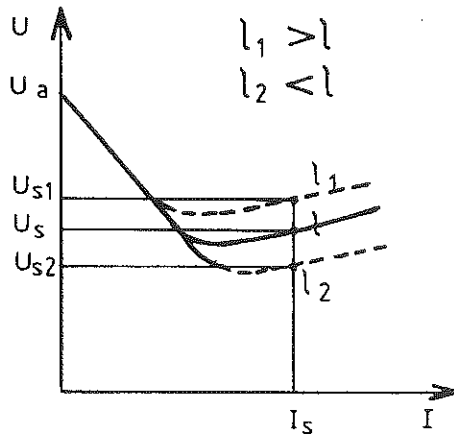


Fig. 253



U = tension, I = intensité
 U_a = tension d'amorçage de l'arc
 U_s = tension de fonctionnement stable pour une valeur déterminée de l_s
 U_{s1} et U_{s2} = tension de fonctionnement variable pour l_s constant et l variable
 l = longueur de l'arc

3.5. Générateur à courant constant

Fig. 254

Lors du soudage manuel, la longueur de l'arc est tributaire des mouvements de la main de l'opérateur. Elle est donc relativement variable. Or, il convient que le débit d'électrode soit peu dépendant de ces variations. Au voisinage du point de fonctionnement nominal, on a

$$U_{\text{gén}} \approx U_{\text{nom}} - r \Delta I$$

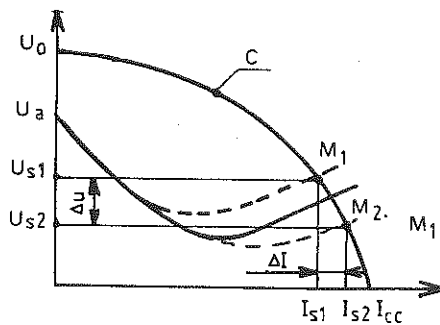
$$U_{\text{arc}} \approx U_{\text{nom}} + R \Delta I + \frac{dR}{dl} \Delta l I,$$

r = pente de la caractéristique

d'où U_{gén} = U_{arc} pour

$$(R + r) \Delta I + \frac{dR}{dl} \Delta l I = 0$$

$$\text{et } \frac{\Delta I}{I} = \frac{-\frac{dR}{dl} \Delta l}{R + r}$$



U₀ = tension à vide
 I_{cc} = intensité de court-circuit
 C = caractéristiques externes de l'appareil de soudage
 M₁ et M₂ = Point de fonctionnement de l'arc

peu d'influence de Δu sur ΔI dans la partie basse de la courbe où I_{s1} ≈ I_{s2}

Le débit étant proportionnel à l'intensité, il faudra que la pente r de la caractéristique du générateur soit aussi grande que possible (générateur à courant (presque) constant).

Fig. 255

3.6. Polarité

La polarité *directe* est : pièce \oplus
baguette -

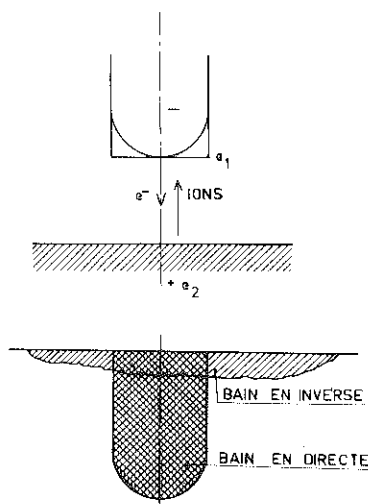


Fig. 256

La polarité *inverse* est moins stable.

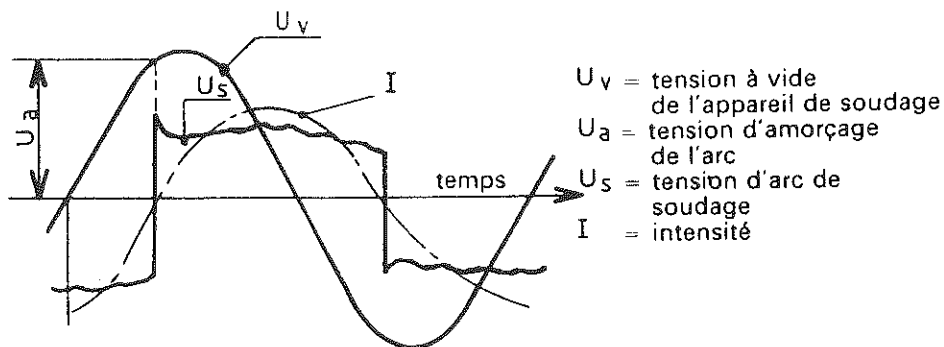
3.7. Soudage en courant alternatif : c'est également possible, et le générateur est moins cher. L'arc s'éteint chaque fois que le courant s'annule. Pour qu'il se rallume, il faut qu'à ce moment

$$U_{vide} > U_{arc},$$

ce qu'on exprime en disant que le coefficient de stabilité

$$\Phi = \frac{U_{arc}}{U_{vide}} < 1,$$

et aussi petit que possible.



courbes de tension et d'intensité pour un arc de soudage, en courant alternatif

Fig. 257

On notera que cela implique un $\cos \varphi$ assez faible

$$\cos \varphi = 0,3 \dots 0,4, \text{ inductif.}$$

Le courant alternatif a pour avantage que la différence de température entre les deux électrodes tend à disparaître.

Les e^- ont une plus grande énergie cinétique \Rightarrow la borne \oplus est plus chaude, plus profondément. A la borne -, la sortie des e^- détruit la formation d'oxydes (décapant)

3.8. Electrodes enrobées

Les électrodes enrobées servent surtout pour le soudage manuel des *aciers doux*. L'enrobage améliore la *stabilité* de l'arc et forme une couche protectrice de gaz et de laitier. Il en résulte une protection contre l'*oxydation* et un *refroidissement moins brutal*, qui évite la trempe. Parfois, l'enrobage contient des additifs pour améliorer les propriétés mécaniques.

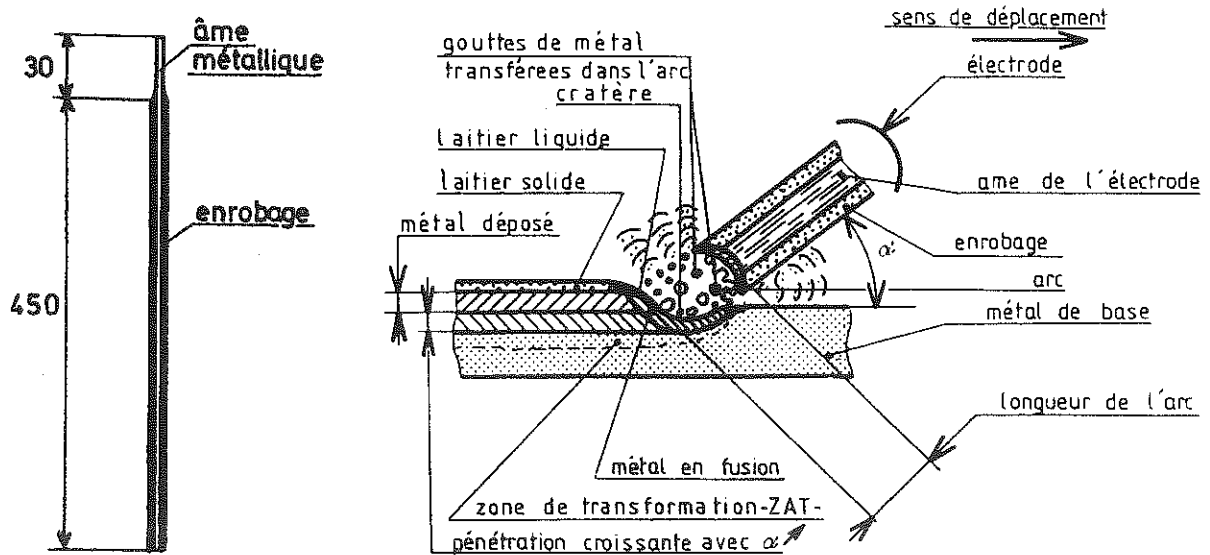


Fig. 258

Soudage à plat								Poids du métal à déposer par mètre de soudure (g)
Présentation des extrémités à assembler	e - épaisseur	a - écartement	h - talon	Chanfrein (α)	Conditions de soudage	Ø des électrodes*		
						1 ^{re} passe	Passes suivantes	
	2	1	—	—	sans	2,5	—	70
	3	2				3,15		100
	4	3				4		220
	5	3,5				5		330
	6	4				5		420
	6	2				1,5		80°
8	2,5	2	70°	3,15	4	470		
10	3	2	70°	3,15	4	700		
	12	1,5	—	60°	Bout à bout avec reprise à l'envers	3,15	4	490
	16	2						
	20	2,5	sans	60°	↓	3,15	4	1 250
	30	3						2 700
	40	3,5						4 200
	40	3,5						4 200

Fig. 259

T.I.G

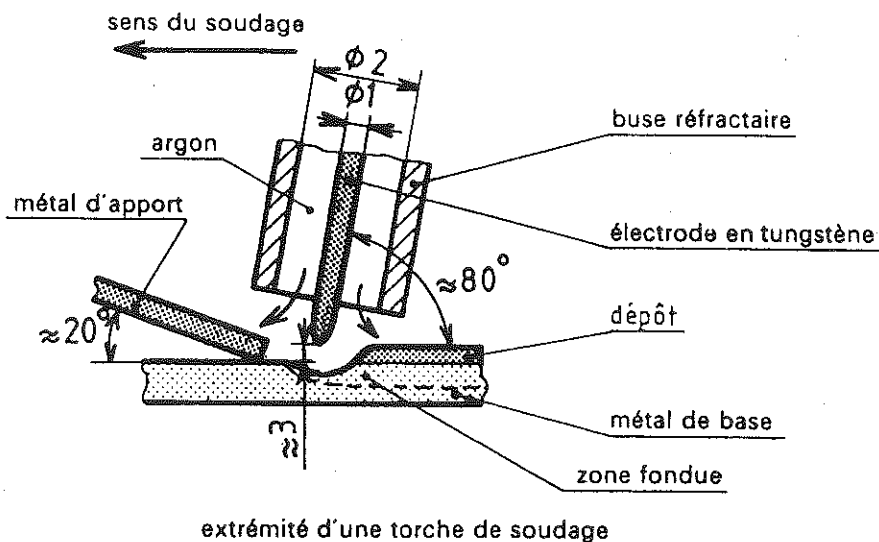


Fig. 260

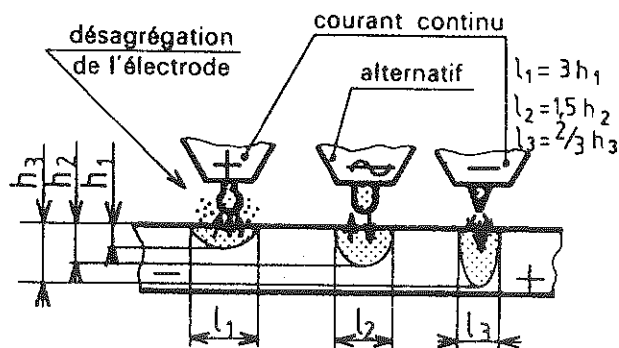


Fig. 261

ϕ_1 électrode	1	1,6	2	2,4
Intensité	15 à 50	60 à 150	100 à 200	130 à 250
ϕ_2 buse	6 à 9	9 à 11	11 à 13	13 à 15

ϕ_1 électrode	3,2	4	5
Intensité	220 à 300	300 à 400	350 à 550
ϕ_2 buse	15 à 18		18 à 22

Épaisseur à souder mm	Intensité moyenne amp.	ϕ du fil d'apport mm	Débit argon L/mm	Vitesse de soudage cm/mm	Métaux à assembler
0,8 1 1,5 3 5 15 10	35 45 70 125 170 175 325	sans ou 1,5 2 3 4 4 5	6 7 7 7 8 8 10	28 25 20 15 10 10 10	ALUMINIUM Courant alternatif
0,7 1,2 1,5 2	60 100 120 130	1,5 1,5	4 4 4 5	35 35 32 30	ACIER DOUX Courant continu, électrode (-)
0,6 0,8 1 1,5 2 3	25 40 70 90 100 125	1 1,5 1,5 2	4 4 4 4 4 5	30 30 30 28 25 22	ACIER INOXYDABLE Courant continu, électrode (-)

Fig. 262

Fig. 263

4. Soudage TIG

TIG = Tungsten Inert Gas

L'électrode est en tungstène. Le gaz est de l'argon. Le métal d'apport est amené en *baguette séparée*.

On utilise le TIG pour l'*aluminium*, l'*inox*, et l'acier en *grandes épaisseurs*.

Pour les *métaux lourds*, on utilise du courant continu en polarité *directe*. La *polarité inverse* est à éviter, car elle entraîne un bombardement de l'électrode de tungstène par les électrons, ce qui l'endommage.

L'*aluminium* se soude en courant *alternatif*. C'est qu'en polarité directe, la pièce, positive, s'oxyde aisément, et cet oxyde est réfractaire. En alternatif, au moment où la pièce redevient négative, la couche d'oxyde est dissipée.

M.I.G

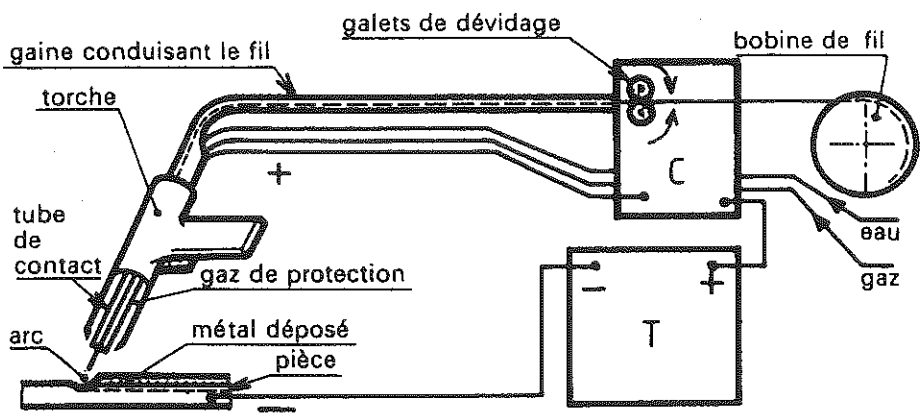


Fig. 264

C — coffret de commande (courant - gaz - eau)
 T — source de courant continu (redresseur ou génératrice)

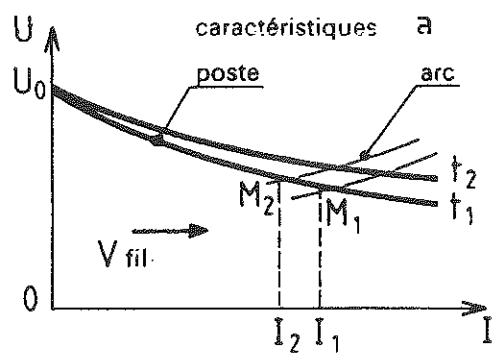
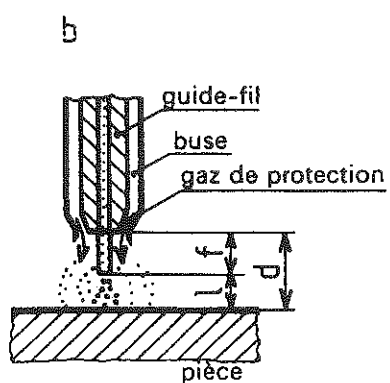
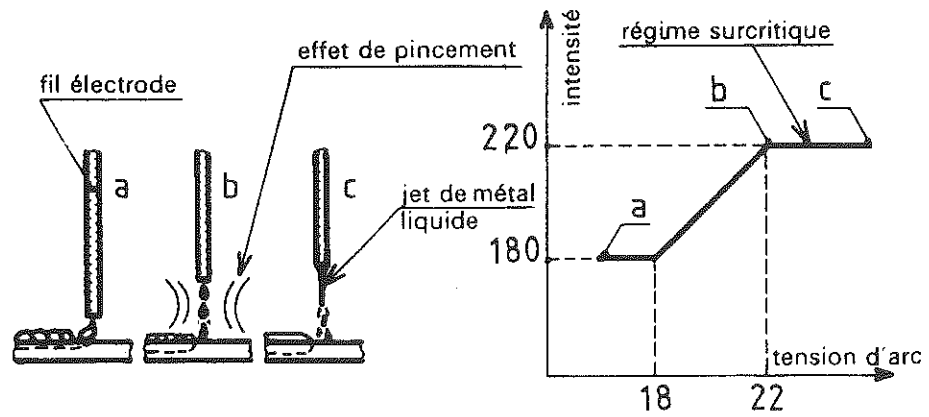


Fig. 265

courbes caractéristiques des appareils pour soudage MIG ou MAG



a = dépôt par court-circuit
 b = dépôt en pluie
 c = pulvérisation axiale

exemple pour un fil d'aluminium de \varnothing 1,6 mm

Fig. 266

5. Soudage MIG (Metal Inert Gas)

5.1. Le soudage MIG s'applique à l'acier et l'aluminium. C'est un procédé automatisable. Le métal d'apport se présente sous forme de *fil* qui se déroule à vitesse constante. On travaille toujours en *polarité inverse* (fil positif), ce qui accroît la vitesse de fusion. Cette polarité est d'ailleurs nécessaire pour souder l'aluminium (voir + haut).

5.2. Autorégulation

L'arc étant établi, sa tension est U_0 et son courant, I_0 . Si la longueur de l'arc varie, on aura un ΔI tel que

$$U_{\text{gén}} = U_0 - r \Delta I$$

$$U_{\text{arc}} = U_0 + R \Delta I + I_0 \frac{dR}{dl} \Delta l$$

Ces deux tensions étant égales, on a

$$(R+r) \Delta I + I_0 \frac{dR}{dl} \Delta l = 0,$$

soit

$$\Delta I = -I_0 \frac{\frac{dR}{dl}}{R+r} \Delta l \quad (1)$$

Mais le débit de fil est donné par

$$G = a I \Rightarrow \Delta G = a \Delta I;$$

par ailleurs,

$$G = S (v + \dot{\Delta l} \cos \alpha) \Rightarrow \Delta G = S \dot{\Delta l} \cos \alpha.$$

On en déduit

$$\Delta I = \frac{S \cos \alpha}{a} \dot{\Delta l}$$

et, à partir de (1),

$$\dot{\Delta l} = -\frac{a}{S \cos \alpha} I_0 \frac{\frac{dR}{dl}}{R+r} \Delta l$$

Il y a donc un amortissement de Δl , d'autant plus grand que r est plus petit : il convient d'avoir un générateur "à tension constante".

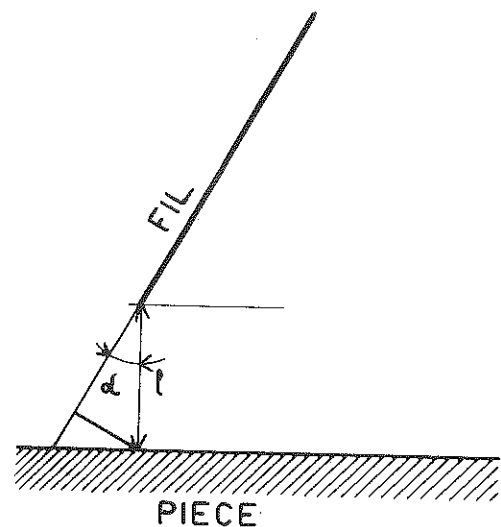


Fig. 267

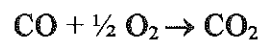
6. Soudage MAG (Metal Active Gas)

Très voisin du procédé MIG, il s'en distingue par l'utilisation de CO_2 au lieu d'argon.

A haute température, le CO_2 se décompose :



Il se recompose sur la pièce froide :



et cette réaction, exothermique, *améliore la pénétration.*

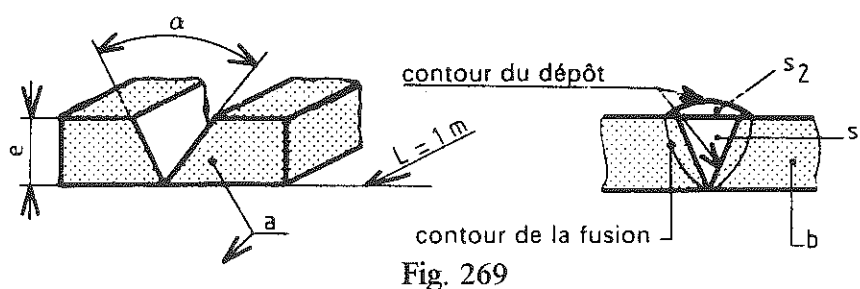
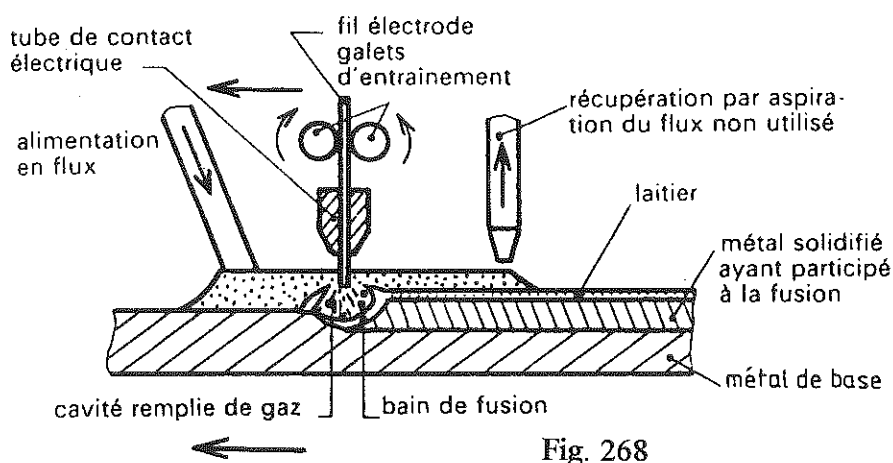
7. Le soudage sous flux solide

Le *flux* est une poudre jouant le même rôle que l'enrobage d'une électrode. Il forme sur le cordon un laitier qui se détache aisément.

L'alimentation en fil est comparable à celle du procédé MIG. Ce procédé permet de très fortes intensités et, par conséquent, de grandes pénétrations.

Conçu pour être entièrement automatique, ce procédé s'applique particulièrement aux grandes soudures du G.C.

SOUS FLUX SOLIDE



Épaisseur e en mm	Angles α usuels				
	30°	60°	70°	90°	
5	6,7	14,4	17,5	25	$V_1 = S_1 \times l =$ volume d à déposer en cm^3 par mètre de longueur. $V_2 = S_2 \times l \approx$ 10 à 15 % de V_1 si $\alpha = 90^\circ$
10	26,8	57,7	70	100	
15	60,3	129,8	157,5	220	
20	107,2	230,8	280	400	
25	167,5	360,6	435,5	625	
30	241,2	519,3	630	900	
35	328,3	706,8	857,5	1225	
40	428,8	923,2	1120	1400	

Fig. 270

Volume réel de métal à apporter pour effectuer la soudure = $V_1 + V_2$.

8. Soudures par points

8.1. Ce procédé s'applique aux tôles. Ses avantages sont

- un faible échauffement local, donc de faibles contraintes résiduelles
- une mise en oeuvre plus rapide et une plus grande légèreté que les boulons ou les rivets.

Le soudage par points est très utilisé en automobile.

Les *électrodes* sont en cuivre refroidi à l'eau. Les différentes étapes sont

- a) accostage (pincer les tôles)
- b) passage du courant et soudure. La pression diminue parce que le métal fond.
- f) forgeage : plus de courant, mais on presse.
- c) écartement des électrodes.

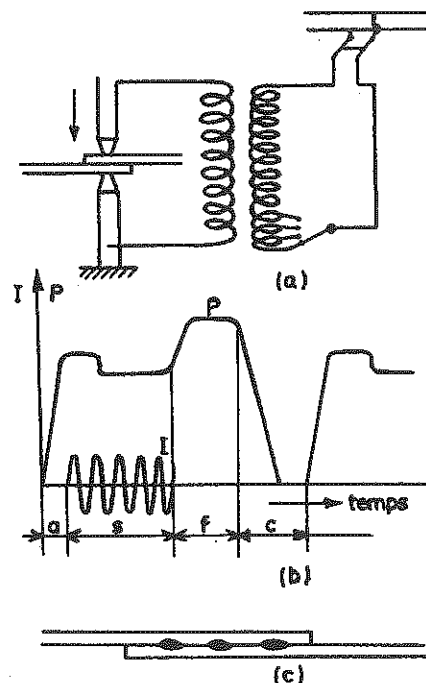
Les points de soudure ont pour diamètre

$$d = 2e + 3 \text{ mm si } e < 8 \text{ mm}$$

$$2e + 2 \text{ mm si } e \geq 8 \text{ mm}$$

Soudure par points.

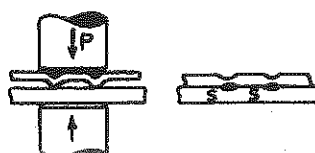
Fig. 271

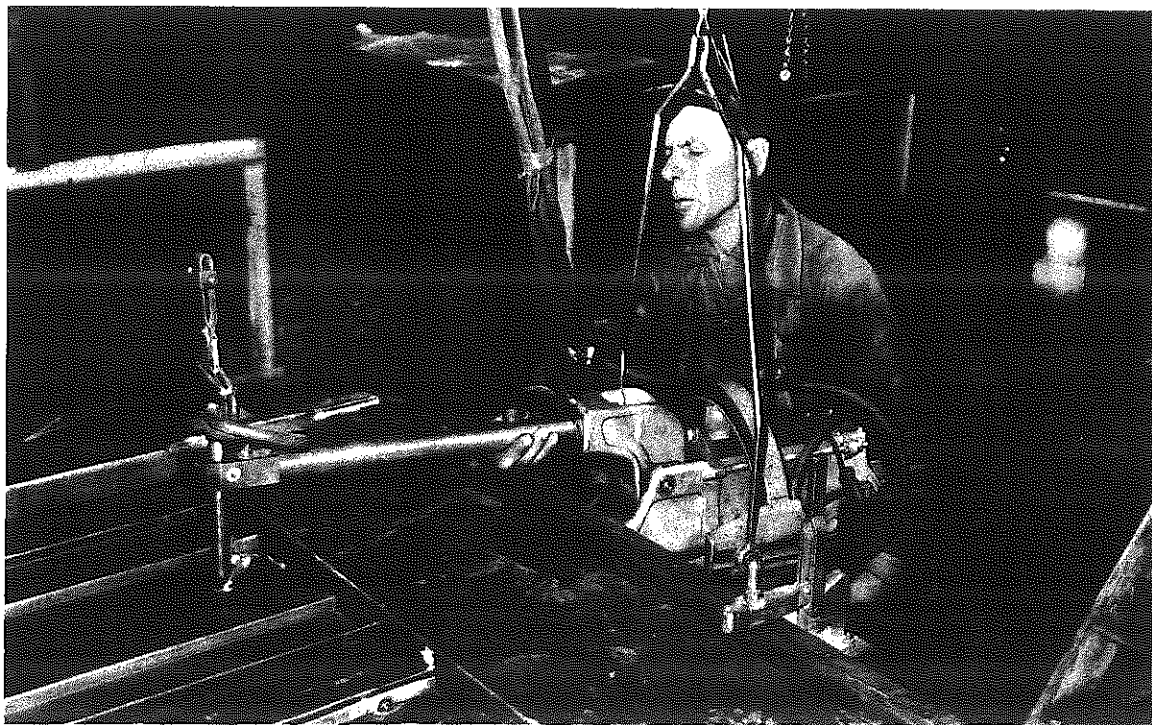


8.2. La soudure *par bossages* est une variante de la précédente où une des pièces porte des bossages qui préfigurent les points de soudure.

Soudure par bossage

Fig. 272





La mécanique dans la construction : pince à souder de grande puissance pour l'assemblage de maisons préfabriquées.

Fig. 273

9. Soudage au galet

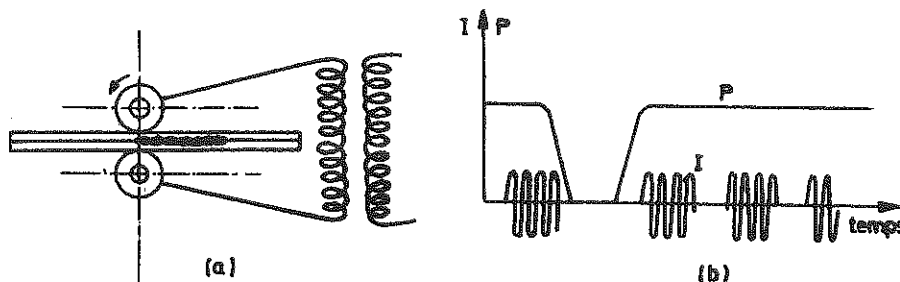


Fig. 274

Ce procédé permet d'obtenir des points très rapprochés et même jointifs. Ici, on maintient toujours la pression de forgeage.

Utilisation : soudures étanches (réservoirs).

10. Soudage en bout par résistance

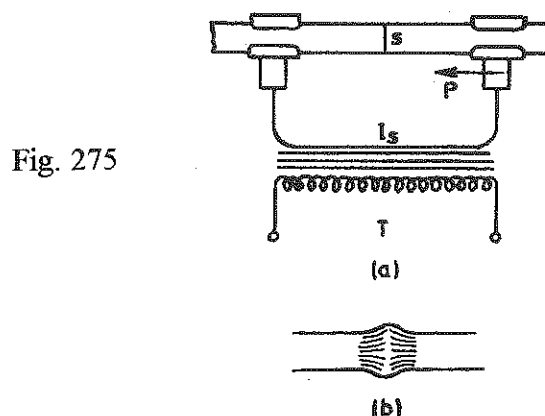


Fig. 275

Les pièces étant pressées, on y fait passer un courant.

11. Soudage en bout par étincelage

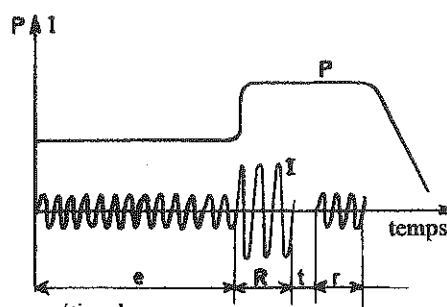
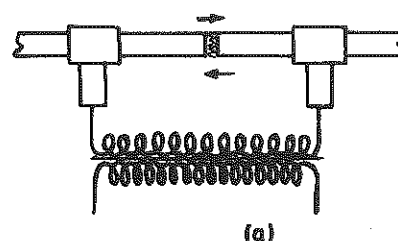


Fig. 276

e : étincelage
 R : refoulement
 t : temps
 r : recuit

(b)

- Les pièces sont placées bout à bout. Le courant étant établi, on les écarte légèrement, de manière à faire jaillir un arc (étincelage).
On rapproche et ré-écarter plusieurs fois les pièces de la même façon, selon leur grandeur.
- Lorsque la température est suffisante, on presse les deux pièces.
- Après un certain temps t de refroidissement, on fait passer un courant moindre, pour produire un requit de stabilisation et relaxation.

Ce procédé s'applique à des pièces dont la section peut aller de moins d' 1 cm^2 à 20 et même 100 cm^2 .

12. Soudage par frottement

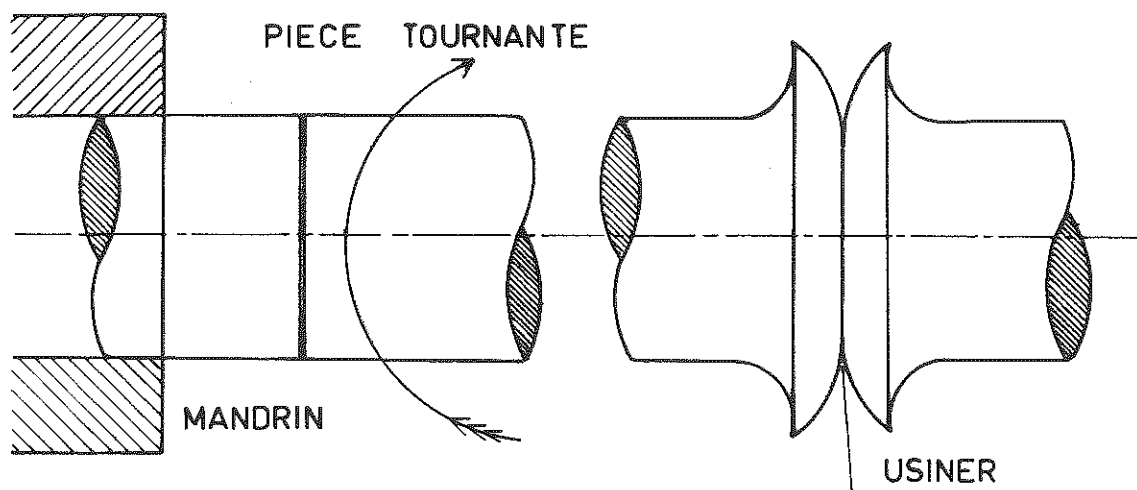


Fig. 277

13.3. Résistance mécanique : une brasure travaille normalement en *cisaillement*. Il existe une *épaisseur optimale* pour laquelle la brasure a une résistance au cisaillement R_g maximale. Le plus souvent, on calcule les brasures de manière que l'assemblage ait au moins la résistance de la plus faible des pièces assemblées. Ainsi, pour l'assemblage de deux tubes,

$$R_m \cdot \pi (d - e) e \leq 0,8 R_g \pi dl \Rightarrow l = \dots$$

Le coefficient 0,8 est une sécurité, liée au fait que R_g varie avec les tolérances des deux pièces.

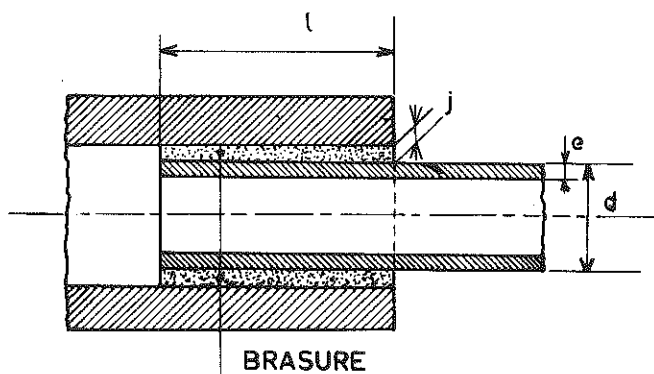
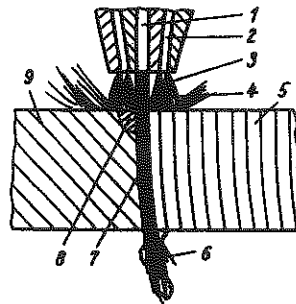


Fig. 281

13.4. Brasures courantes

- Brasure de l'électronicien (Etain, Pb)
- Brasure Al - Si
- Brasure Cu - Sn (bronze TOBIN) : sert entre autres à braser des plaquettes de carbure sur les outils (travaille en compression)
- Brasure à l'Ag

14. Oxycoupage



1. Gicleur de coupe
2. Gicleur de chauffe
3. Flamme de chauffe
4. Flux d' O_2 pour la coupe
5. Stries après coupe
6. Scories
7. Front de coupe
8. Zone de préchauffage
9. Pièce à découper

Fig. 282

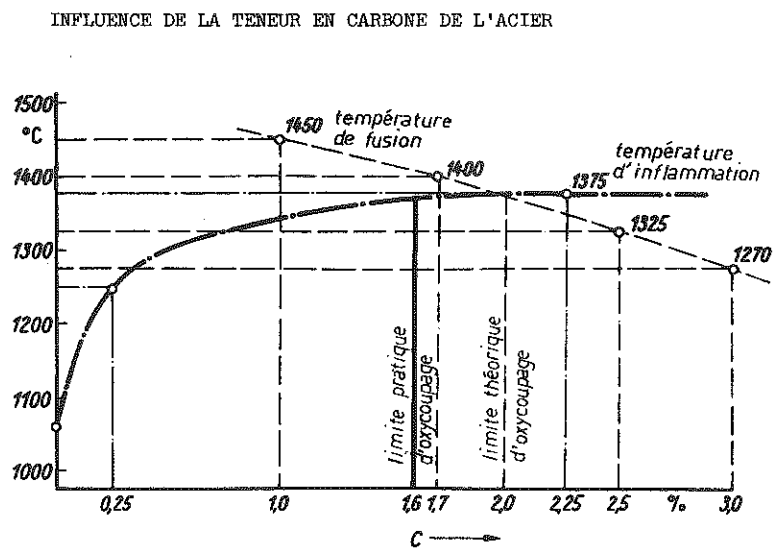


Fig. 283

14.1. L'oxycoupage n'est pas un procédé de *fusion* mais de *combustion* du métal. Pour qu'il soit possible, il faut que l'on ait la situation suivante :

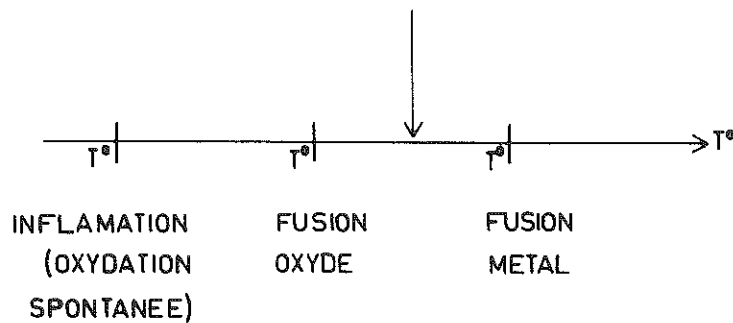


Fig. 284

La chaleur fournie par le gicleur de chauffe conduit à une température telle que l'oxygène du gicleur de coup enflamme le métal. Cette combustion doit être *exothermique*, de manière à mener à une température telle que l'oxyde fonde :

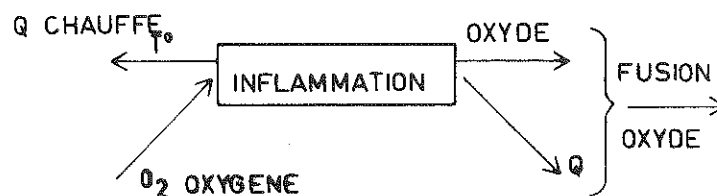


Fig. 285

14.2. Ce procédé s'applique aux aciers au carbone, jusque $C = 1,6 \%$. Il ne fonctionne pas pour

- les aciers au Cr, car Cr_2O_3 est réfractaire
- l'aluminium, car Al_2O_3 est réfractaire
- la fonte, car $T_{fus} < T_{mf}$

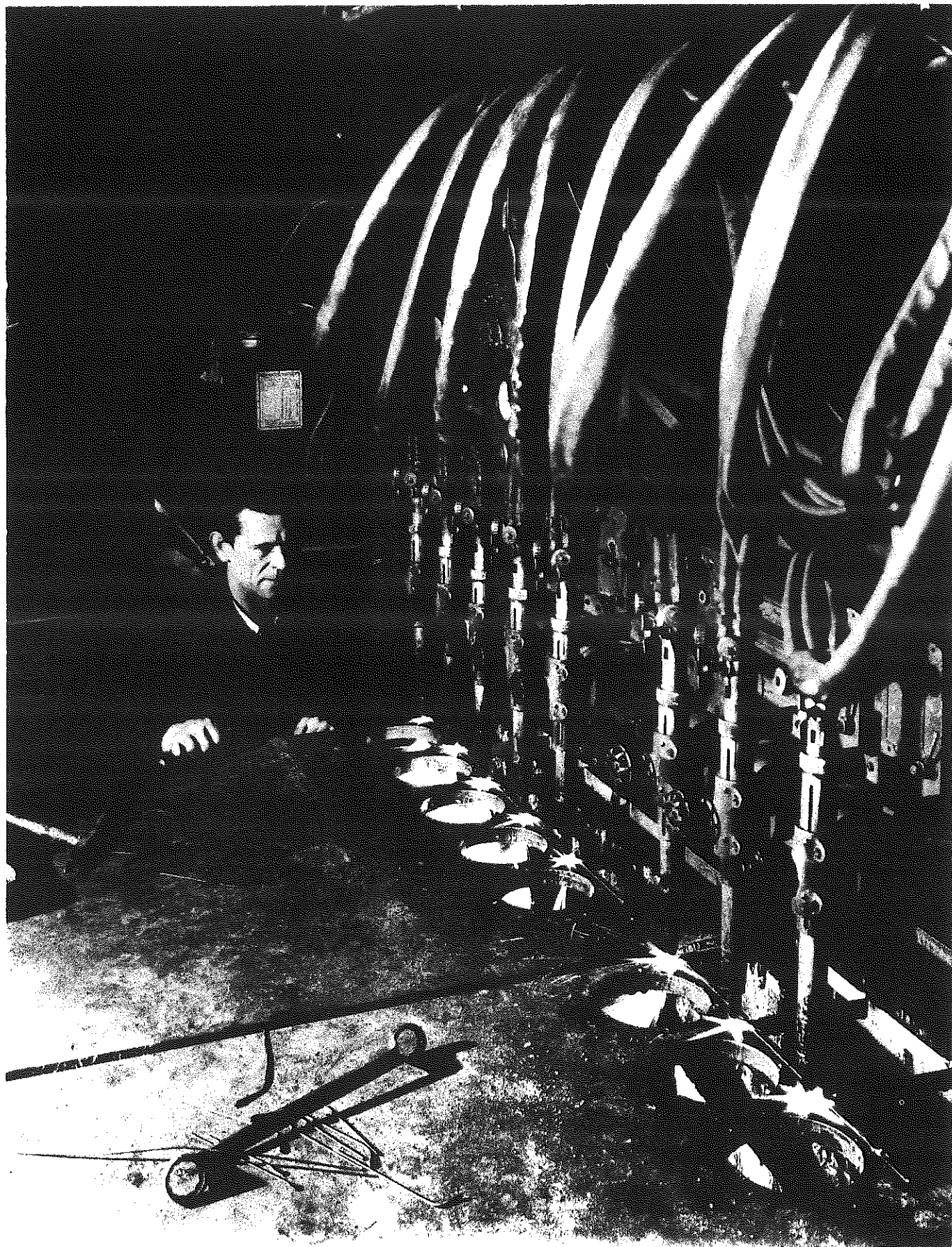


Fig. 286

Bibliographie - Soudage, brasage, oxycoupage

1. A. CAMPA : *Technologie générale pour les mécaniciens. Tome 1.* Foucher, Paris, 1971.
2. R. DIETRICH *et al.* : *Précis de construction mécanique. Tome 2.* AFNOR, Paris, 1979.
3. R. GRANJON, P. ROSEMBERG, M. PIETTE : *Eléments de soudure autogène.* Publications de l'Acétylène et de la Soudure Autogène, Paris, 1920.
4. J. NEGRE : *Le soudage électrique par résistance.* Publications de la Soudure Autogène, Paris, 1972.
5. P. POLOUKHINE *et al.* : *Technologie des métaux.* Mir, Moscou, 1967.
6. J. TRIOULEYRE : *Procédés de jonction.* Delagrave, Paris, 1979.
7. *Manuel de brasage fort.* Publications de la Soudure Autogène, Paris 1981.

7. MÉTALLURGIE DES POUDRES

Notions de métallurgie des poudres

(Peter HILLE - *Spanlose Fertigungsverfahren*)

Ce procédé permet d'obtenir des pièces à partir de poudres.

1. Production des poudres.

Ces poudres doivent être fines et leurs grains aussi sphériques que possible. On peut utiliser des procédés mécaniques ou physico-chimiques.

2. Mélange des poudres

C'est un avantage essentiel de la métallurgie des poudres de permettre le mélange de corps non miscibles à l'état liquide, par exemple

Cu - Pb; Ag - Pb

3. Traitement

3.1. Compactage. La poudre est *pressée*. Cette opération diminue sensiblement son volume apparent (parfois $\rightarrow \frac{1}{2}$ à $\frac{1}{6}$). Mais le corps obtenu est fragile et friable. Les qualités mécaniques résulteront du frittage.

3.2. Frittage. Maintenant la pression, on chauffe. Voici quelques températures de référence :

Bz : 600 ... 800°C

Fe : 1200 ... 1300°C

Carbure : 1400 ... 1600°C

W, Mo, Ta : 2000 ... 3000°C

A ces hautes températures, la mobilité atomique est telle qu'il se produit des soudures entre grains.

Après refroidissement, un acier fritté peut arriver à $R_m = 200 \dots 600$ MPa.

3.3. On peut achever par un pressage final (10 % de compactage) pour améliorer la densité et les tolérances. On peut même procéder à un deuxième frittage.

4. Facteurs d'influence

- a) *Forme des grains* : un grain sphérique est idéal
- b) *Grosseur des grains* : 0,1 ... 1000 μm . L'uniformité de la granulométrie est très importante.
- c) *Pression* : une augmentation de la pression augmente la densité.

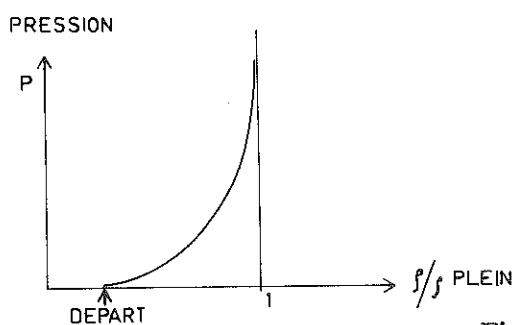


Fig. 287

- d) *Température* : une augmentation de la température conduit à des soudures plus larges.
- e) *Temps de frittage* : son rôle est moindre. S'il augmente, le rayon de raccordement des grains s'agrandit.

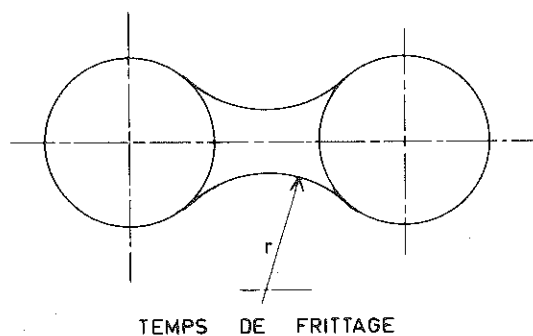


Fig. 288

5. Classification des produits frittés (en fct de $\varepsilon = \frac{V_{vide}}{V_{apparent}}$) ($\varepsilon \downarrow \Rightarrow \rho \uparrow$)

- | | |
|---------------|---|
| ε | utilisation |
| 0,6 | filtres, dispositifs anti-retour de flamme, ... |
| 0,4 | paliers lisses, étanchéités, anneaux de guidage, pièces à faible R_m |
| 0,25 | paliers lisses, pièces de résistance moyenne, engrenages de pompes à huile, amortisseurs de chocs |
| 0,15 | pièces à haute résistance, soll. statiques et dynamiques |
| 0,07 | pièces très sollicitées, à propriétés magnétiques spéciales |
| 0,03 | pièces résistant à la corrosion, à grande résistance de flexion. |

8. PROCÉDÉS SPÉCIAUX D'USINAGE

Procédés spéciaux d'usinage

Voici un tableau des performances de divers procédés. Nous étudierons la puissance spécifique brute P/Q , la puissance courante, le débit, la précision.

Procédé	P/Q (GPa)	Puissance courante (kW)	Débit correspondant (cm ³ /s)	Précision	
				la meilleure (μm)	à P _{max} (μm)
Tournage	2,5	25	10	2,5	125
Rectification	25	20	0,8	2,5	75
Plasma	50	150	3	250	2500
Electro-érosion	100	12,5	0,125	12,5	125
Electrochimique	400	150	0,375	12,5	125
Ultrasons	500	12,5	0,025	5	25
Electro Beam	25 000	7,5	0,0003	5	25
Laser	150 000	15	0,0001	12,5	125
Chimique	-	---	0,5	12,5	50

On constatera que sur le plan énergétique, la coupe est le procédé le plus économique. Les usinages spéciaux ne se justifient donc que dans la mesure où ils permettent des choses nouvelles.

Fig. 289

USINAGE AUX ULTRASONS

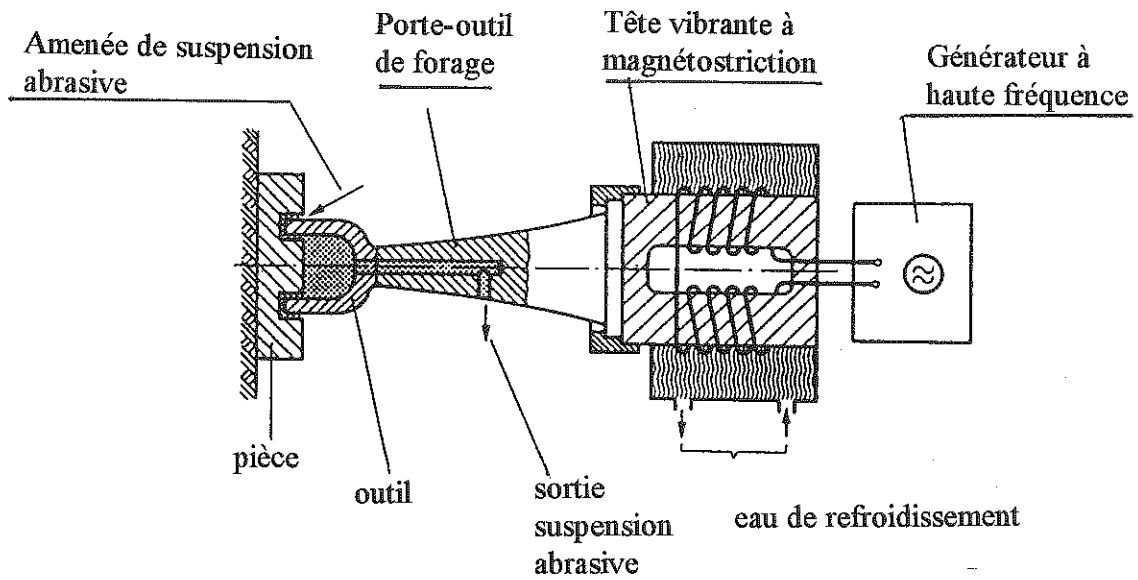


Fig. 290

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

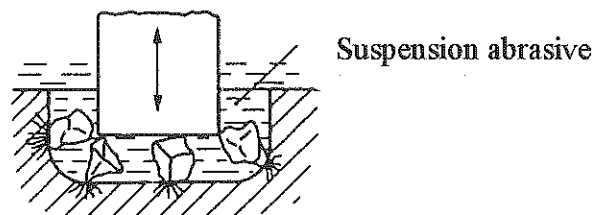


Fig. 291

Usinage aux ultrasons

1. L'usinage aux ultrasons consiste à *marteler* la pièce par des grains d'abrasif, sous l'action d'un outil en vibrations. L'impact d'un grain provoque le détachement *fragile* d'une écaille. Il va donc sans dire que ce procédé ne convient que pour le travail des matériaux *fragiles*. L'outil, quant à lui, doit être *ductile* (cuivre, par exemple).

Pratiquement, on amène les abrasifs sous forme d'une suspension dans un liquide. Les mouvements de l'outil doivent être très rapides si l'on veut une productivité suffisante. On l'excite donc à une fréquence très élevée, de l'ordre de 25 000 Hz. Il s'agit donc d'une fréquence ultrasonique, d'où le nom du procédé. Pour y arriver, on utilise une tête vibrante à magnétostriction, et le mouvement est amplifié par une *sonotrode*, dont le principe est le suivant : son premier mode de vibration libre-libre présente un maximum plus important à l'extrémité que du côté de l'excitation.

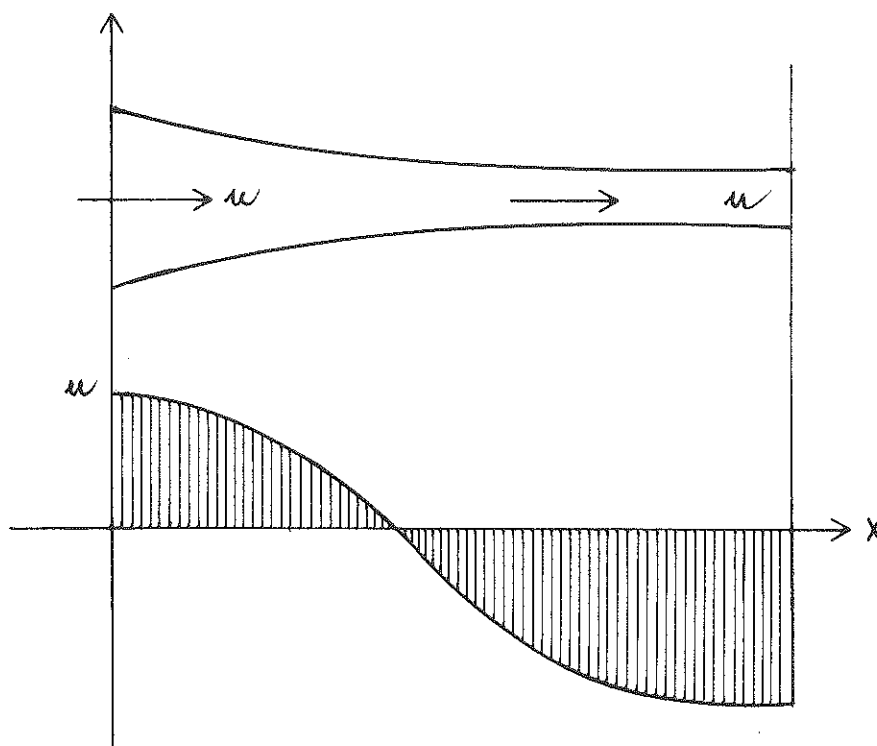


Fig. 292

2. Asservissement. Le système est asservi de manière à donner un effort moyen sur la pièce constant. La figure ci-contre représente un tel asservissement.

L'effort est mesuré. Après amplification, la mesure de cet effort, si elle est hors norme, provoque une alarme. On compare alors l'effort mesuré à la consigne, ce qui permet de déterminer une mesure à prendre quant à l'avance. Celle-ci, donnée par vis, est encore contrôlée.

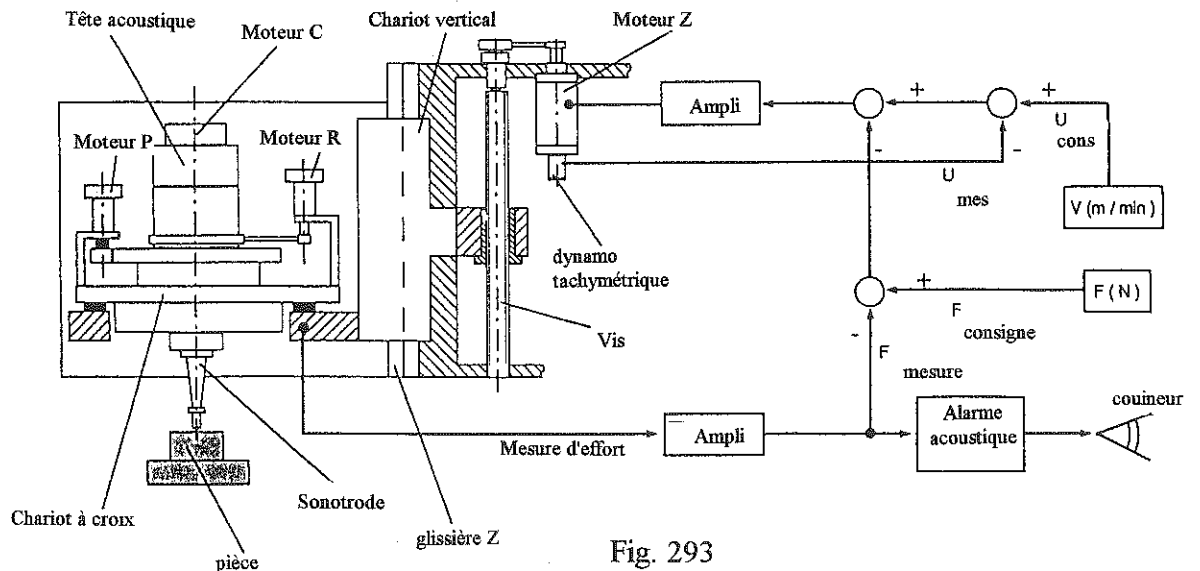


Fig. 293

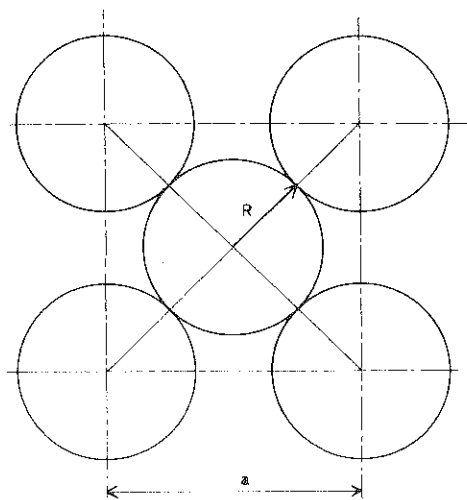
PRINCIPE DE REGULATION DE L'AVANCE D'UNE INSTALLATION A ULTRASONS

3. Modélisation élémentaire

3.1. Coefficient de concentration des grains

La concentration maximale en grains s'obtient pour la géométrie suivante, où le carré de côté a

contient $1 + \frac{4}{4} = 2$ grains, avec



$$a\sqrt{2} = 4R, \quad a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$$

La surface de cette maille est

$$S = a^2 = \frac{16}{2} R^2 = 8R^2$$

R 289

Fig. 294

On a donc, pour un nombre $n = 2$ de grains,

$$S = 4 n R^2.$$

On mesure la concentration par le nombre

$$\beta = \frac{4 n R^2}{S}$$

appelé *coefficient de concentration*.

3.2. Analyse dimensionnelle

Interviennent dans le problème :

1. La vitesse d'avance	v	L/T
2. L'amplitude du mvt	y_0	L
3. La pulsation	w	$1/T$
4. La contrainte statique sur l'outil	σ_s	F/L^2
5. La dureté de la pièce	HB	F/L^2
6. Le rayon moyen des grains	R	L
7. Le coefficient de conc.	η	1

soit 7 grandeurs, pour 3 unités. Il nous faut donc former 4 nombres sans dimension. Nous choisirons

- π_1 contenant v : $\frac{v}{w y_0}$
- π_2 contenant σ_s : $\frac{\sigma_s}{H}$
- $\pi_3 = \eta$
- Il reste π_4 contenant R : y_0/R .

Nous pouvons donc affirmer qu'il existe une relation

$$\frac{v}{w y_0} = f\left(\frac{y_0}{R}, \frac{\sigma_s}{HB}, \eta\right).$$

L'expérience montre que, pour des contraintes moyennes pas trop grandes, la vitesse d'avance est proportionnelle à σ_s . Nous écrivons donc

$$\frac{v}{w y_0} = \frac{\sigma_s}{HB} f'\left(\frac{y_0}{R}, \eta\right)$$

L'expérience montre que $v \neq \sigma_s$

$$\Rightarrow \frac{v}{y_o w} = \frac{\sigma_s}{HB} f' \left(\frac{y_o}{R}, \eta \right)$$

Analyse simplifiée

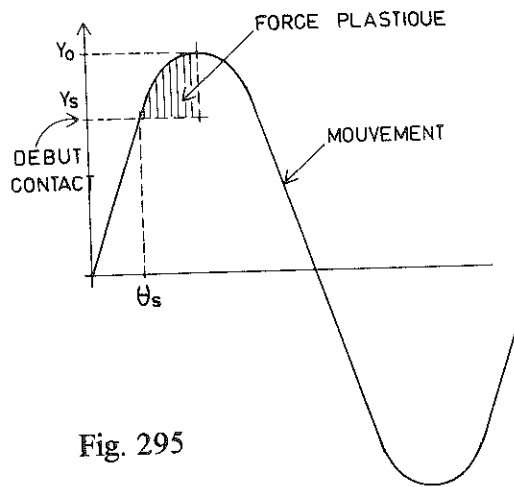


Fig. 295

Sur 1 grain,

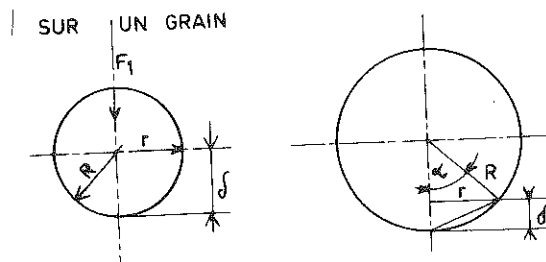


Fig. 296

On admet que $F_1 = HB \cdot \text{surface} = HB \cdot \pi r^2 = 2\pi \cdot HB \cdot R \cdot \delta = k\delta$ $k = 2\pi \cdot HB \cdot R$

$$F_1 = k(y - y_s) = k y_o (\sin \theta - \sin \theta_s)$$

$$\bar{F}_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta_s}^{\pi/2} k y_o (\sin \theta - \sin \theta_s) = \frac{1}{2\pi} k y_o \left[-\cos \theta - \theta \sin \theta_s \right]_{\theta_s}^{\pi/2} = \frac{1}{2\pi} k y_o \left[\cos \theta_s - \frac{\pi}{2} \sin \theta_s + \theta_s \sin \theta_s \right]$$

avec

$$y_o \sin \theta_s = y_s \qquad y \cos \theta_s = \sqrt{1 - \frac{y_s^2}{y_o^2}}$$

$$\bar{F}_1 = \frac{k y_o}{2\pi} \left[\sqrt{1 - \frac{y_s^2}{y_o^2}} - \frac{\pi}{2} \frac{y_s}{y_o} + \frac{y_s}{y_o} \arcsin \frac{y_s}{y_o} \right] \qquad y_s = y_o - \delta_o$$

$$= \frac{k y_o}{2\pi} \left[\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right)^2} - \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right) + \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right) \arcsin \left(1 - \frac{\delta_o}{y_o}\right) \right] = \frac{k y_o}{2\pi} F \left(\frac{\delta_o}{y_o} \right)$$

δ_o/y_o	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$f\left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)$	0	0,02997	0,08520	0,1574	0,2436	0,3424	0,4528	0,5741	0,7059	0,8479	1
$\log \delta_o/y_o$		-1	-0,6990	-0,5229	-0,3979	-0,3010	-0,2218	-0,1549	-0,09691	-0,04376	0
$\log F$		-1,523	-1,070	-0,8030	-0,6133	-0,4655	-0,3441	-0,2410	-0,1513	-0,07166	0
$\left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,5}$	0	0,03162	0,08944	0,1643	0,2530	0,3536	0,4648	0,5857	0,7155	0,8538	1
$\left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,530}$		0,02951	0,08523	0,1585	0,2461	0,3463	0,4577	0,5794	0,7108	0,8511	1

$$F \approx 1,013 \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,521} \approx \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,5} \approx \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,530}$$

Fig. 297

ajusté

Donc

$$\bar{F}_1 \approx \frac{ky_o}{2\pi} \cdot \left(\frac{\delta_o}{y_o}\right)^{1,5} = R.HB. \frac{\delta_o^{1,5}}{y_o^{0,5}}$$

Pour N grains, on a donc

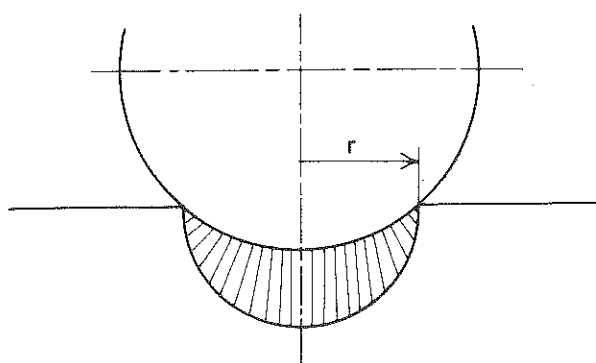
$$\bar{F} = N\bar{F}_1 = NR.HB. \frac{\delta_o^{0,5}}{y_o^{0,5}}$$

La contrainte moyenne est alors

$$\sigma_s = \frac{\bar{F}}{S} = \frac{N}{S} R.HB. \frac{\delta_o^{1,5}}{y_o^{0,5}}$$

$$\text{Or, } \eta = \frac{4NR^2}{S} \Rightarrow \frac{NR}{S} = \frac{\eta}{4R} \Rightarrow \sigma_s = \frac{\eta}{4R} HB \frac{\delta_o^{1,5}}{y_o^{0,5}} \quad (1)$$

* Le volume enlevé par grain sera évalué comme la demi-sphère de rayon r, soit



$$V_1 = \frac{2}{3} \pi r^3 = \frac{2}{3} \pi (2R\delta_o)^{3/2}$$

Pour les N grains, il vient

$$V = NV_1 = \frac{2}{3} \pi N (2R\delta_o)^{3/2}$$

et, comme

Fig. 298

$$N = \frac{\eta S}{4R^2},$$

on obtient

$$V = \frac{2}{3} \pi \frac{\eta S}{4R^2} (2R\delta_o)^{3/2}$$

Ce volume est enlevé au cours d'un cycle, de temps $\frac{2\pi}{\omega}$. Donc

$$\dot{V} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{2}{3} \pi \frac{\eta S}{4R^2} (2R\delta_o)^{3/2} = \frac{\omega \eta S}{12R^2} (2R\delta_o)^{3/2}$$

La vitesse d'avancement est alors

$$v = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\omega \eta}{12R^2} (2R\delta_o)^{3/2} \quad (2)$$

On peut écrire (1) sous la forme

$$\frac{\sigma_s}{HB} = \frac{\eta}{4} \cdot \left(\frac{\delta_o}{R}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right)^{0,5} \quad (1')$$

et (2) équivaut à

$$\frac{v}{\omega y_o} = \frac{\eta}{12} \cdot 2^{3/2} \frac{\delta_o^{1,5}}{R^{0,5} y_o} = \frac{\eta}{12} \cdot 2^{3/2} \left(\frac{\delta_o}{R}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right) \quad (2')$$

Divisant ces deux relations, on obtient

$$\frac{\frac{v}{\omega y_o}}{\frac{\sigma_s}{HB}} = \frac{1}{3} \cdot 2^{3/2} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right)^{1/2},$$

soit

$$\frac{v}{\omega y_o} = 0,9428 \cdot \frac{\sigma_s}{HB} \cdot \left(\frac{R}{y_o}\right)^{1/2}$$

ou encore

$$v = 0,9428 \omega_o \cdot \frac{\sigma_s}{HB} \cdot \sqrt{R y_o}$$

En fait, l'efficacité est bien moindre, car les grains sont de grandeur variable, et les petits grains pénètrent élastiquement. Il est bon de poser

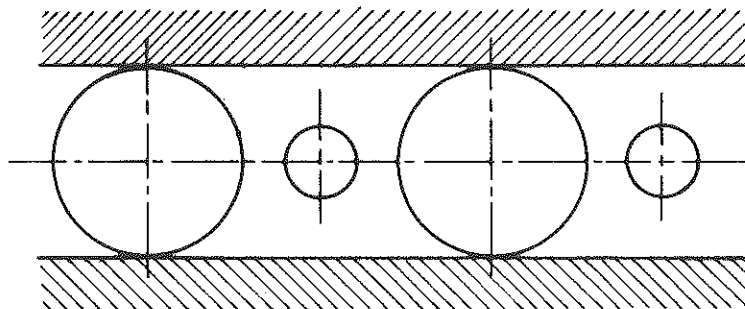


Fig. 299

$$v \approx 0,1 \varpi_o \frac{\sigma_s}{HB} \sqrt{Ry_o}$$

On remarquera que η n'intervient pas dans cette relation simplifiée.

4. Applications

- travail du verre
- découpage des semi-conducteurs
- finition de matrices de matériaux très durs
- finition des poinçons de frappe
- rodage de filières en WC
- découpage de plaques de saphir ou de Ge
- fabrications d'électrodes de graphite de haute qualité pour électroérosion.

MAIS lent !

Sonotrode

Elle est excitée à la fréquence propre de son premier mode d'extension libre-libre. On utilise par exemple une sonotrode exponentielle, dont la section est

$$S(x) = S_0 e^{-2\beta x} \quad (d(x) = d_0 e^{\beta x}).$$

On a donc

$$V = \frac{1}{2} \int_0^l ES \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx = \frac{1}{2} ES_0 \int_0^l e^{-2\beta x} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx$$

$$T = \frac{1}{2} \varpi^2 \int_0^l \rho S \mu^2 dx = \frac{1}{2} \varpi^2 \rho S_0 \int_0^l e^{-2\beta x} \mu^2 dx$$

Les modes propres d'extension ont pour équation

$$-ES_0 \frac{d}{dx} \left(e^{-2\beta x} \frac{du}{dx} \right) + \varpi^2 \rho S_0 e^{-2\beta x} \mu = 0$$

soit

$$\frac{d}{dx} \left(e^{-2\beta x} \frac{du}{dx} \right) + \frac{\varpi^2 \rho}{E} e^{-2\beta x} \mu = 0$$

ou encore, en notant

$$\lambda^2 = \frac{\varpi^2 \rho}{E},$$

$$e^{-2\beta x} \frac{d^2 u}{dx^2} - 2\beta e^{-2\beta x} \frac{du}{dx} + \lambda^2 e^{-2\beta x} u = 0.$$

Simplifiant par $e^{-2\beta x}$, on obtient l'équation linéaire à coefficients constants

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - 2\beta \frac{du}{dx} + \lambda^2 u = 0,$$

cherchant une solution de la forme

$$\mu = A e^{zx},$$

on obtient l'équation caractéristique

$$z^2 - 2\beta z + \lambda^2 = 0.$$

dont les solutions sont

$$z = \beta \pm i\sqrt{\lambda^2 - \beta^2}$$

La solution générale est donc

$$\mu = Ae^{\beta x} \cos(\gamma x + \varphi), \quad \gamma = \sqrt{\lambda^2 - \beta^2}$$

Les modes cherchés correspondent à $\mu'(0) = \mu'(l) = 0$, soit

$$\begin{aligned} Ae^{\beta x} (\beta \cos \varphi - \gamma \sin \varphi) &= 0 \\ Ae^{\beta x} [\beta \cos (\gamma l + \varphi) - \gamma \sin (\gamma l + \varphi)] &= 0 \end{aligned}$$

Il faudra donc que

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\beta}{\gamma}$$

$$\operatorname{tg} (\gamma l + \varphi) = \frac{\beta}{\gamma}$$

La première valeur non nulle de γl qui vérifie la seconde condition est

$$\gamma l = \pi,$$

ce qui donne

$$\gamma = \frac{\pi}{l}$$

et

$$\frac{\omega^2 \rho}{E} = \lambda^2 = \gamma^2 + \beta^2 = \frac{\pi^2}{l^2} + \beta^2 = \frac{\pi^2}{l^2} \left(1 + \frac{\beta^2 l^2}{\pi^2} \right)$$

Donc

$$\omega = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\beta^2 l^2}{\pi^2}}$$

ω_0 , pulsation pour $\beta = 0$

Le coefficient d'amplification est

$$\left| \frac{\mu(l)}{\mu(o)} \right| = \left| \frac{A e^{\beta l} \cos(\gamma l + \varphi)}{A \cos \varphi} \right| = e^{\beta l} = \frac{d(o)}{d(l)}$$

Exemple
(MAFELL)

$$d(o) = 54 \text{ mm}$$

$$d(l) = 18 \text{ mm}$$

$$l = 125 \text{ mm}$$

$$e^{\beta l} = \frac{54}{18} = 3$$

$$\beta l = 1,099$$

$$\beta = \frac{1,099}{0,125} = 8,792 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Acier} \rightarrow \omega_o = \frac{\pi}{0,125} \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{11}}{7800}} = 130400 \text{ s}^{-1}$$

$$= 130700 \sqrt{1 + \left(\frac{1,099}{\pi}\right)^2} = 138200 \text{ s}^{-1}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 21990 \text{ Hz}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\beta}{\gamma} = \frac{\beta l}{\pi} = 0,3498 \quad \varphi = 19,28^\circ \rightarrow \text{noeud env.} \quad \gamma x = \frac{\pi}{180} (90 - 19,28) = 1,234$$

$$x = \frac{1,234 \cdot l}{\pi} = 49,11 \text{ mm}$$

Soit le mode avec $u = q$ à gauche, $u = -kQ$ à droite. Pour ce mode,

$$V = \frac{1}{2}kq^2, \quad T = \frac{1}{2}mw^2q^2$$

et on a, pour une excitation (f_1 à gauche, f_2 à droite),

$$\begin{array}{cc} f_1 & f_2 \\ \rightarrow & \rightarrow \end{array}$$

$$(k - \omega^2 m)q = f_1 - Kf_2$$

Le système se comporte donc comme un levier.

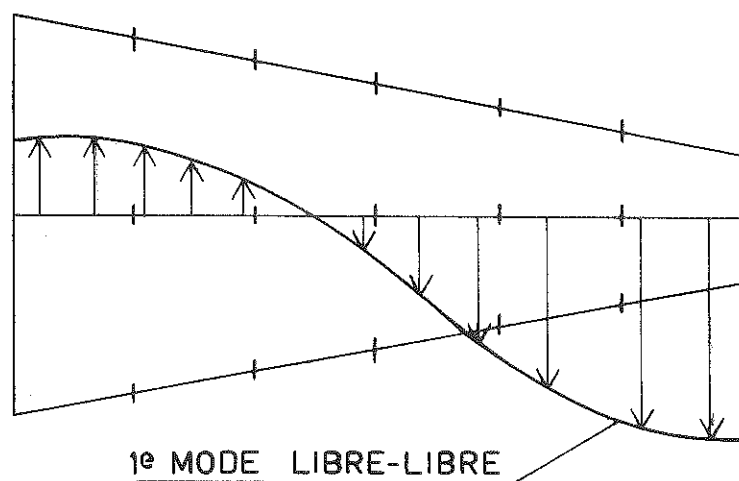
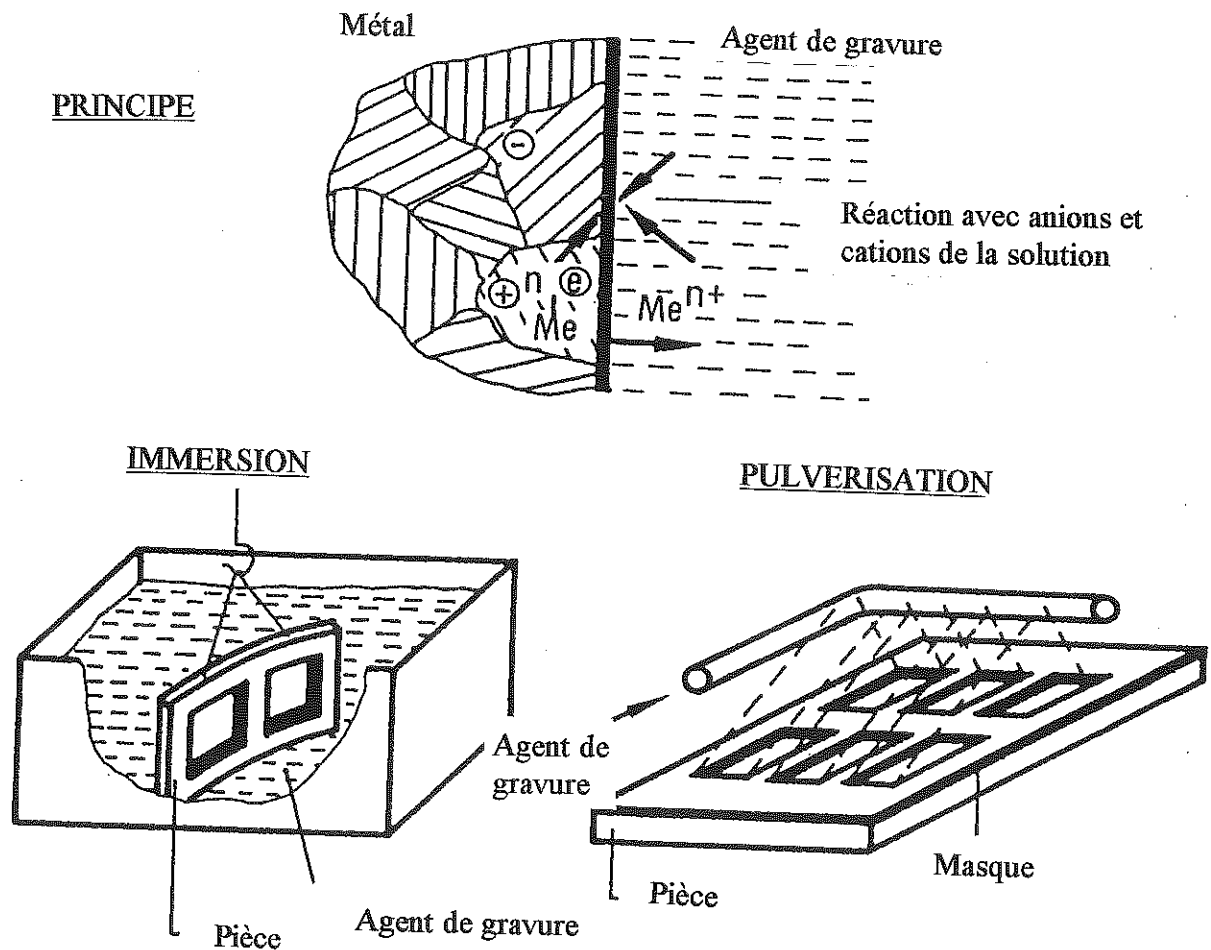


Fig. 300

GRAVURE CHIMIQUE



MILIEU DE TRAVAIL : Solutions aqueuses de HCl, HNO₃, H₂SO₄, NaOH, ...

VITESSE D'EROSION : 0,01 à 0,08 mm/min.

ETAT DE SURFACE : R_a = 1 à 15 μm.

GENERATION DE LA FORME : à l'aide d'un masque. Périodiquement, remuer la pièce ou la sortir de la solution.

Fig. 301

USINAGE ELECTROCHIMIQUE

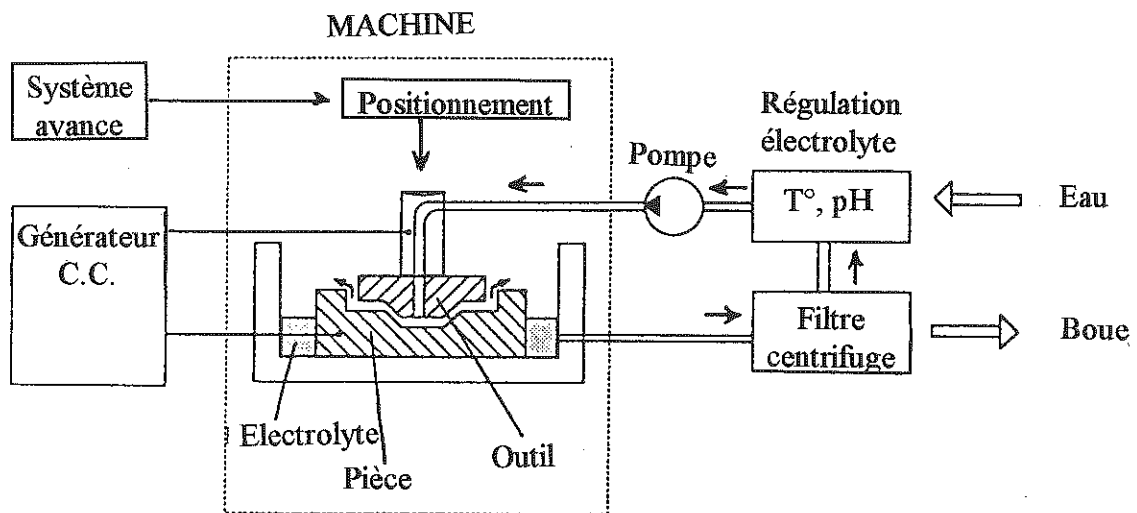
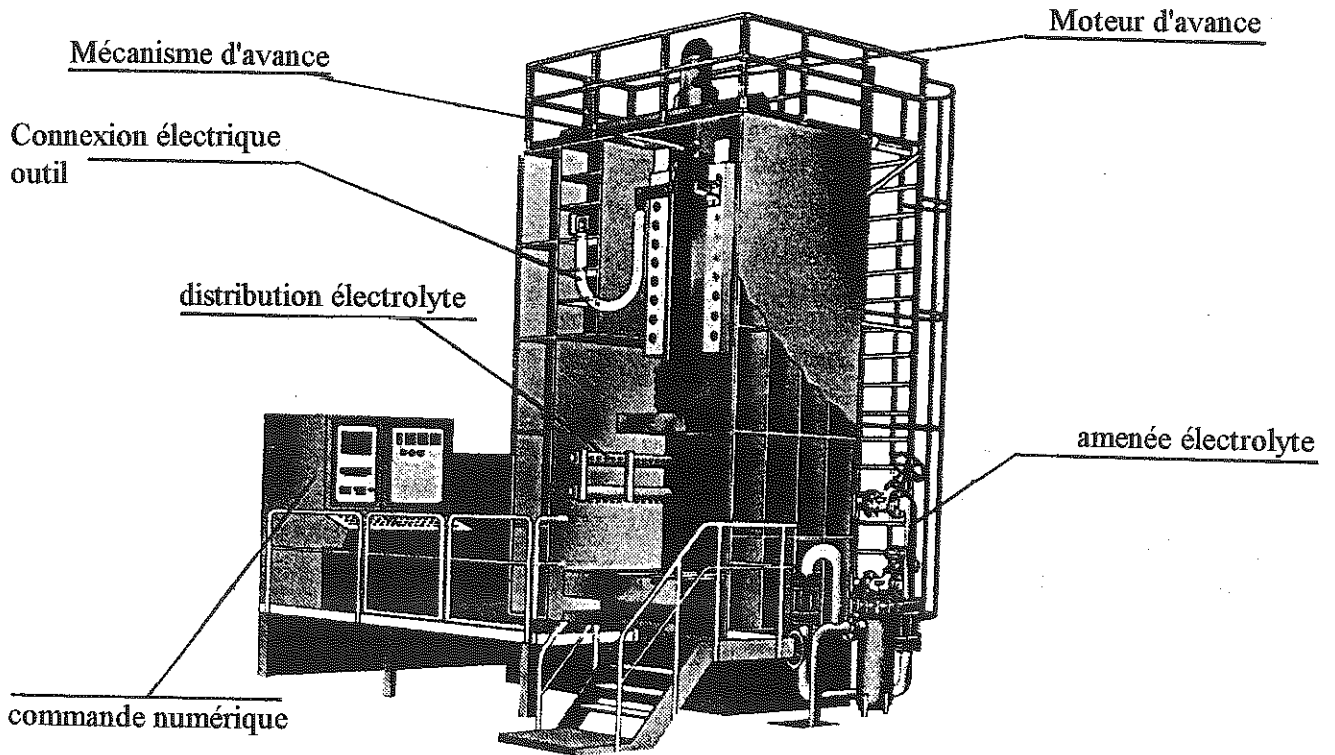


Fig. 302

Usinage électrochimique

1. Développé vers 1958-1960 aux Etats-Unis, ce procédé a pour utilisateurs principaux les industries de l'aéronautique et de l'automobile.

2. Imaginons une pièce en fer et un outi neutre en cuivre, avec une solution saline (NaCl, NaNO₃). On aura les réactions suivantes :

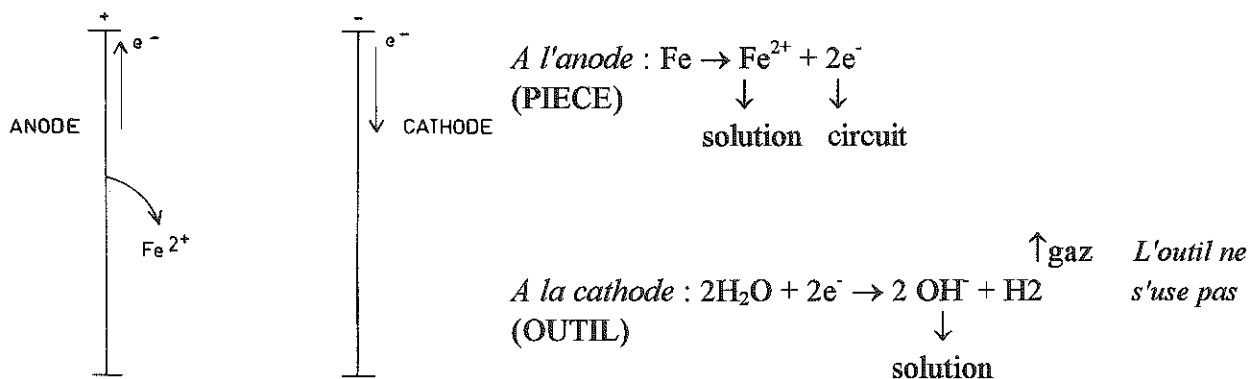
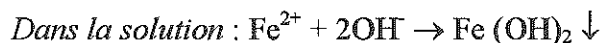


Fig. 303



3. Loi de Faraday : il faut un Faraday, soit

$$\mathcal{F} = 96 \cdot 500 \cdot 000 \text{ Cb}$$

pour former l'équivalent kg d'ions, soit $\frac{M}{z}$ kg d'ions, où M est la masse atomique et z, la valence. Donc, la masse enlevée après un temps t, est

$$m = \frac{M}{z} \cdot \frac{It}{F}$$

En pratique, la réaction est accompagnée de réactions secondaires, et on ne peut compter que sur une portion η du courant pour la réaction principales :

$$m = \eta \frac{M}{z} \frac{It}{F}$$

Le débit volumique est donc

$$\dot{V} = \frac{m}{\rho t} = \eta \frac{M}{\rho zF} I$$

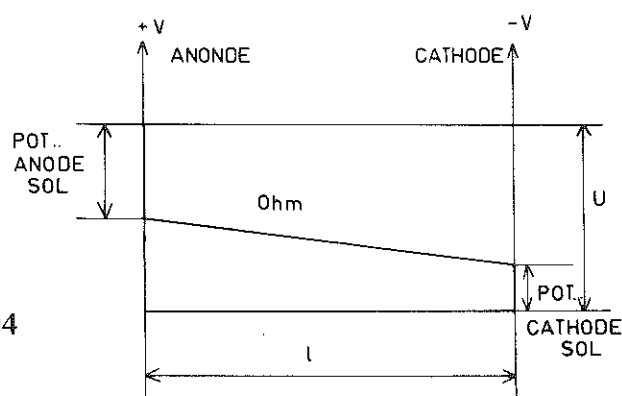
4. Comportement électrique

On a $U = \Delta U_{an} + \Delta U_{cath} + RI$
 ΔU : saut de potentiel

5. Energie spécifique brute

$$\frac{P}{\dot{V}} = \frac{UI}{\dot{V}} = \frac{U\rho zF}{M}$$

Fig. 304



Elle dépend essentiellement de U, donc de ΔU . Plus celui-ci est grand, plus il faut de l'énergie.

6. Isolation de l'outil : nécessaire pour forer un trou cylindrique.

7. Dispositions pratiques

Le diélectrique doit évacuer la production de chaleur donnée par

$$P_{\text{chal}} = RI^2 = (U - \Delta U) I$$

Cette chaleur est emmagasinée par l'électrolyte :

$$P_{\text{chal}} = G c_p \Delta T \quad G = \text{débit massique.}$$

En limitant ΔT à une faible valeur (15°C par ex.) pour éviter l'ébullition, on obtient

$$G = \frac{(U - \Delta U) I}{C_p \Delta T}$$

Ce débit est en général important et, vu la petitesse du gap, il en résultera une forte perte de charge et, donc, une forte pression d'alimentation. On travaille avec

$$p = 5 \dots 50 \text{ bar,}$$

ce qui suppose des machines importantes pour reprendre l'effort normal qui en résulte.

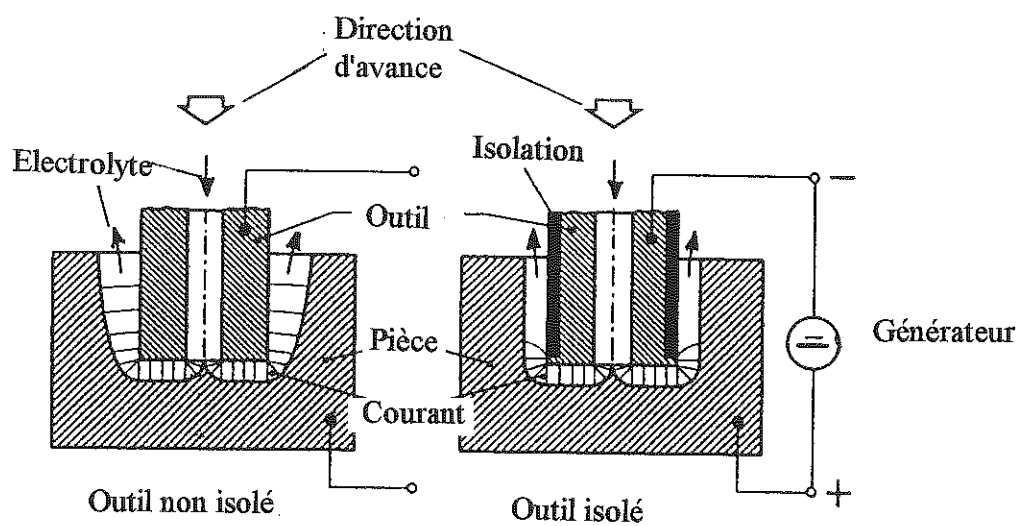


Fig. 305

ELECTRO-EROSION

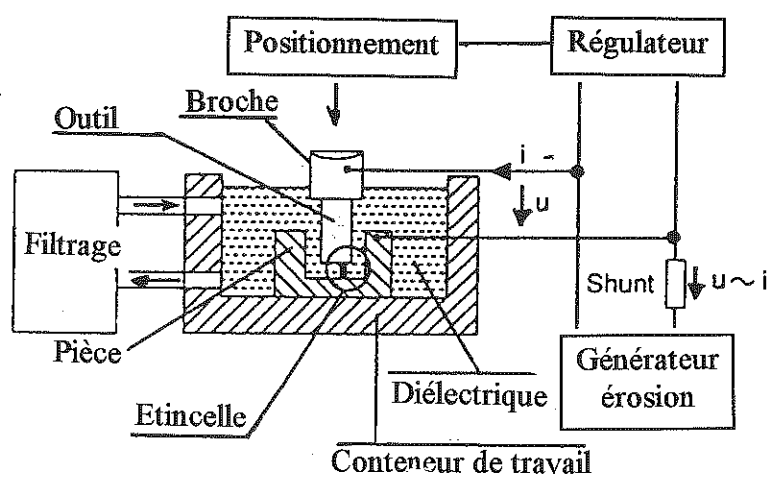
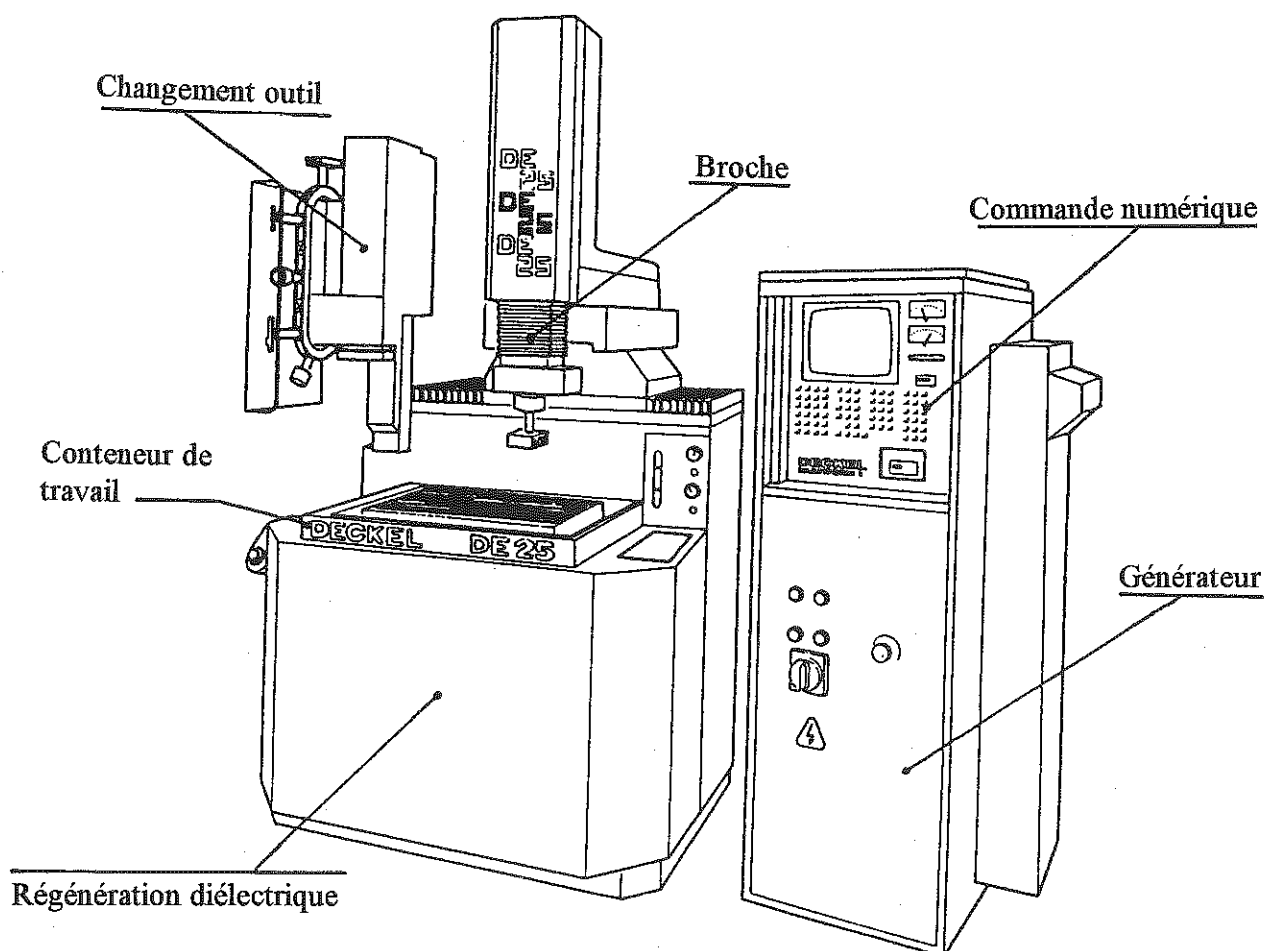


Fig. 306

Electro-érosion

1. L'électro-érosion est, au départ, le fruit des recherches des époux LAZARENKO (URSS, 1944). Le point de départ est le fait qu'en faisant naître une étincelle entre deux électrodes, on provoque leur érosion. Ce phénomène est bien connu dans le cas des interrupteurs. C'est ce phénomène qui rend nécessaire le remplacement périodique des vis platiniées d'une voiture.

Si les deux électrodes sont de même métal, l'étincelle attaque plus la borne \oplus que la borne $-$, du moins pour les étincelles rapides (bombardement électronique). A la différence de l'usinage électrochimique, *l'outil s'use*.

2. Mise en oeuvre. La pièce et l'outil reproduisant en négatif la forme à obtenir sont placés dans un bain d'électrolyte. Un générateur d'impulsions produit un courant pulsé à une fréquence donnée ($f = 20 \dots 300$ kHz). Sous l'effet de champ, il naît en un point une *étincelle*, qui a lieu de préférence entre les points les plus rapprochés. Cette étincelle produit un petit cratère. Le processus continuant, on finit par arracher, petit cratère par petit cratère, une épaisseur appréciable de la pièce. Il faut donc que l'outil avance. La *régulation de l'avance* est le problème le plus *délicat* à résoudre.

2bis. Applicabilité : Il suffit que le matériau soit conducteur, indépendamment de sa dureté. *L'inconvénient* essentiel est la *faible productivité*. Mais on peut couper du nitrure de bore cubique !

3. Fonctionnement de l'étincelle

Entre deux points rapprochés des électrodes, le champ est plus important. Il y a accrochement d'électrons à la cathode. Ceux-ci, heurtant les molécules, provoquent une ionisation intense avec formation de photons. Il naît un canal de plasma conducteur. Le choc des particules \oplus et \ominus sur les électrodes provoque leur échauffement. Elles sont liquéfiées et vaporisées localement. Il y a formation d'une bulle de gaz à très haute pression (10^3 bar). Lorsque le courant est coupé, la pression tombe dans la bulle, ce qui provoque la vaporisation explosive du métal fondu qui est éjecté dans le liquide pour former des particules sphériques.

Au point de vue électrique, la tension est constante entre le moment de la mise sous tension et l'apparition de l'étincelle. A ce moment, la tension diminue.

PARAMETRES DE L'ELECTRO-EROSION

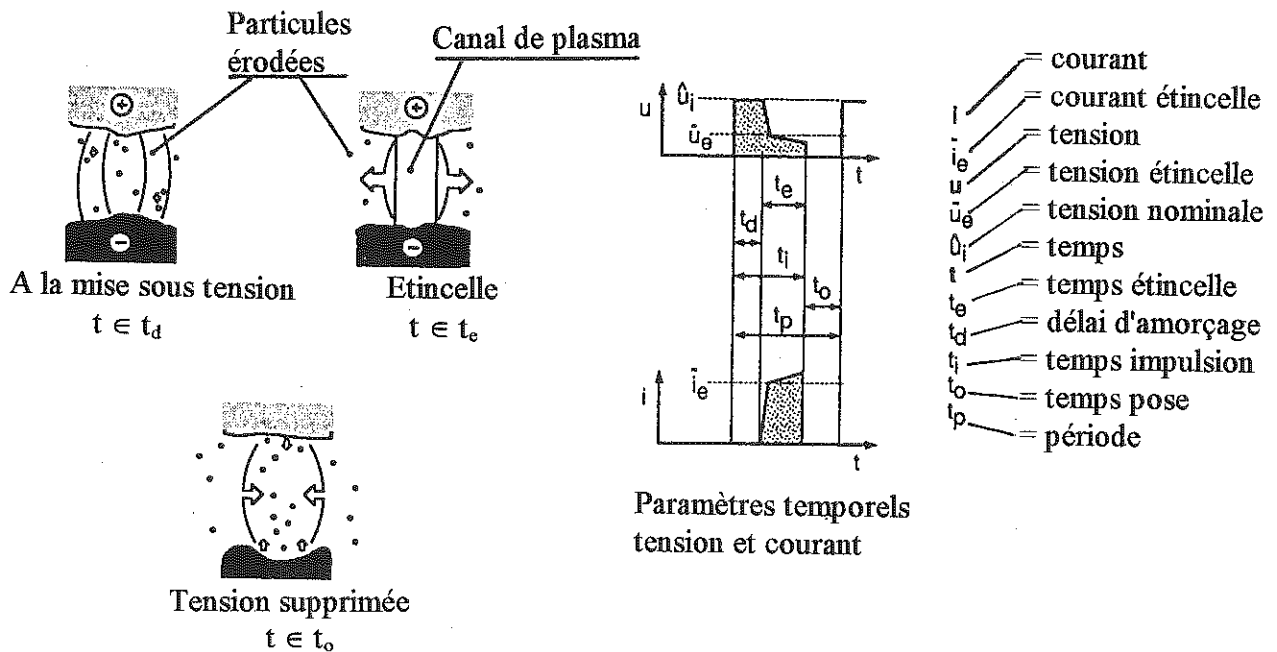


Fig. 307

Asservissement du "gap"

$$u = \frac{1}{T} \int u(t) dt \approx u_i \frac{t_i}{t_p}$$

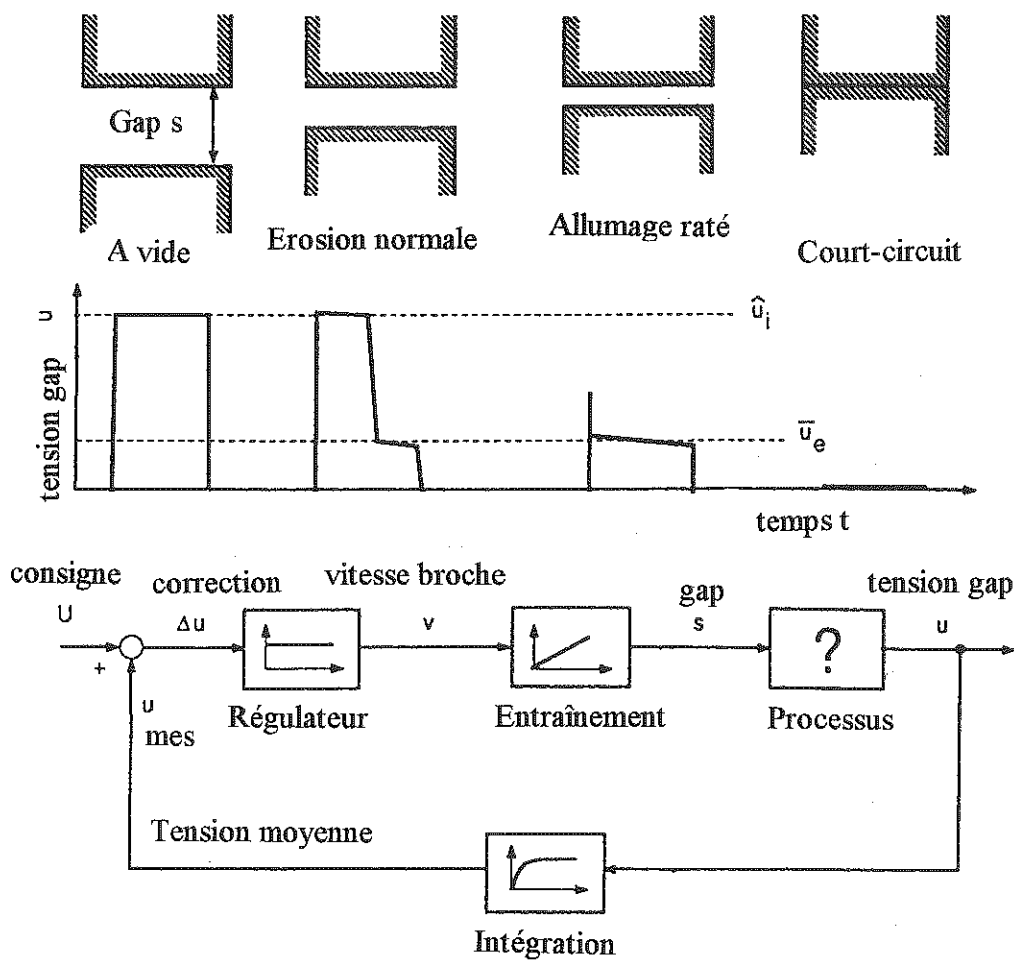


Fig. 308

4. Asservissement du gap

Appelant μ_i la tension nominale et μ_e la tension d'étincelle, voyons comment varie la tension moyenne

$$u = \frac{1}{T} \int_{\text{période}} u(t) dt$$

A vide, il n'y a pas d'étincelle et

$$u = u_i \frac{t_i}{t_p} \quad (\text{gap trop grand})$$

Pour un gap nul,

$$u = 0$$

Pour un gap trop faible,

$$u \approx u_e \frac{t_i}{t_p}$$

Pour une érosion normale,

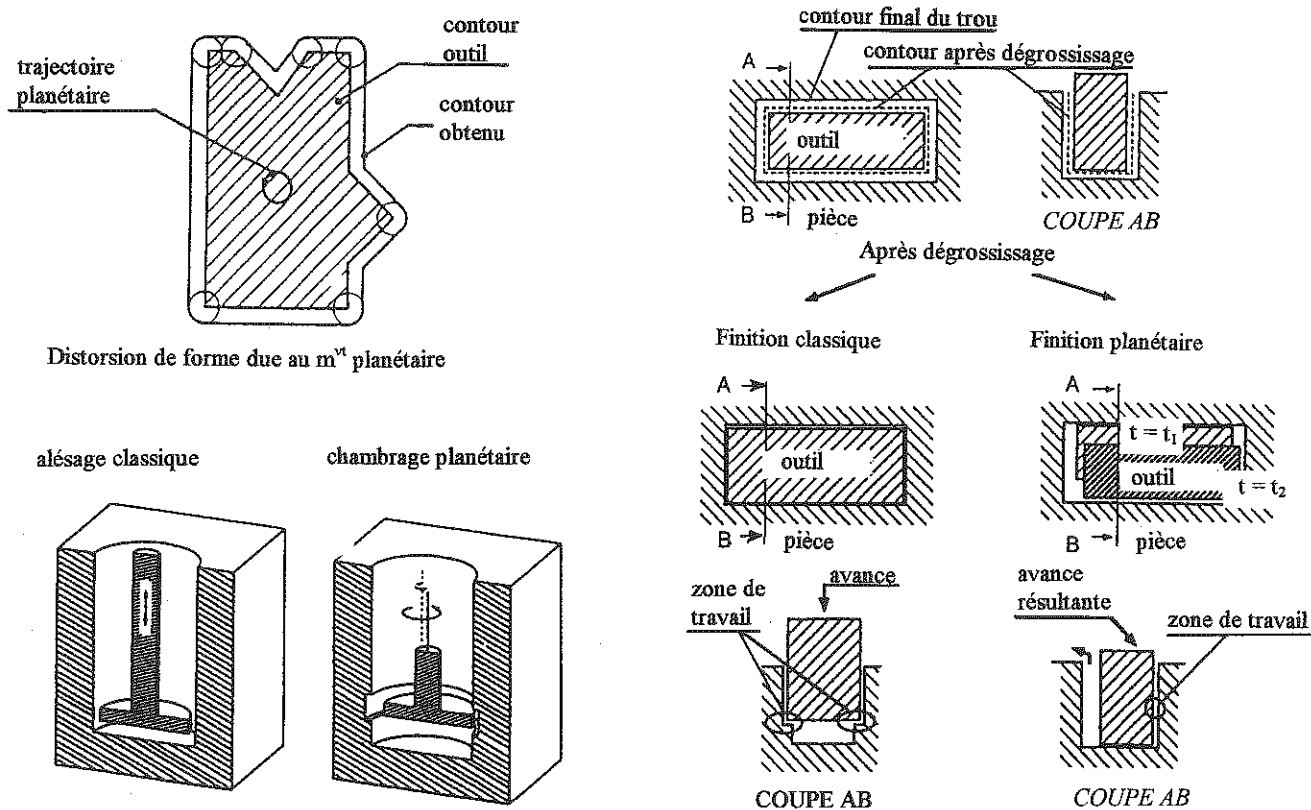
$$u \approx \frac{u_i t_d + u_e t_e}{t_p}$$

On constate donc que la tension moyenne permet de mesurer l'efficacité du processus. Ceci permet de concevoir un système d'asservissement où, à partir de la tension moyenne, on peut établir une correction du gap.

5. Electro-érosion planétaire

On peut donner à l'outil un mouvement planétaire, ce qui permet par exemple de faire une saignée ou de faire la finition d'un trou en travaillant sur la *surface latérale*. On notera que le contour obtenu est alors arrondi.

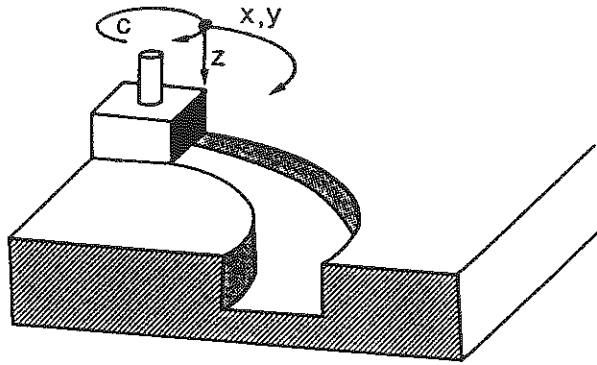
ELECTRO-EROSION PLANETAIRE



production d'une saignée intérieure par chambrage planétaire

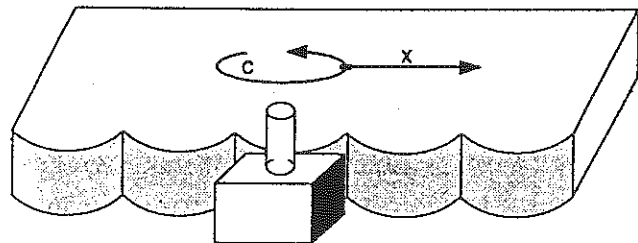
Fig. 309

6. En combinant un mouvement de contournage avec une rotation de l'outil (4 axes), on peut obtenir des formes complexes.



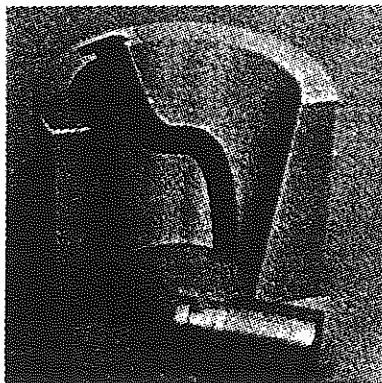
Electro-érosion: contournage combiné avec rotation c

Fig. 310



Erosion selon x combinée avec rotation C

Fig. 311



Exemple d'application du contournage par électro-érosion

Fig. 312

7. Electro-érosion à fil

Un outil trop mince s'userait trop vite. On corrige ce défaut en faisant défiler un fil. Ci-contre une machine à 5 axes.

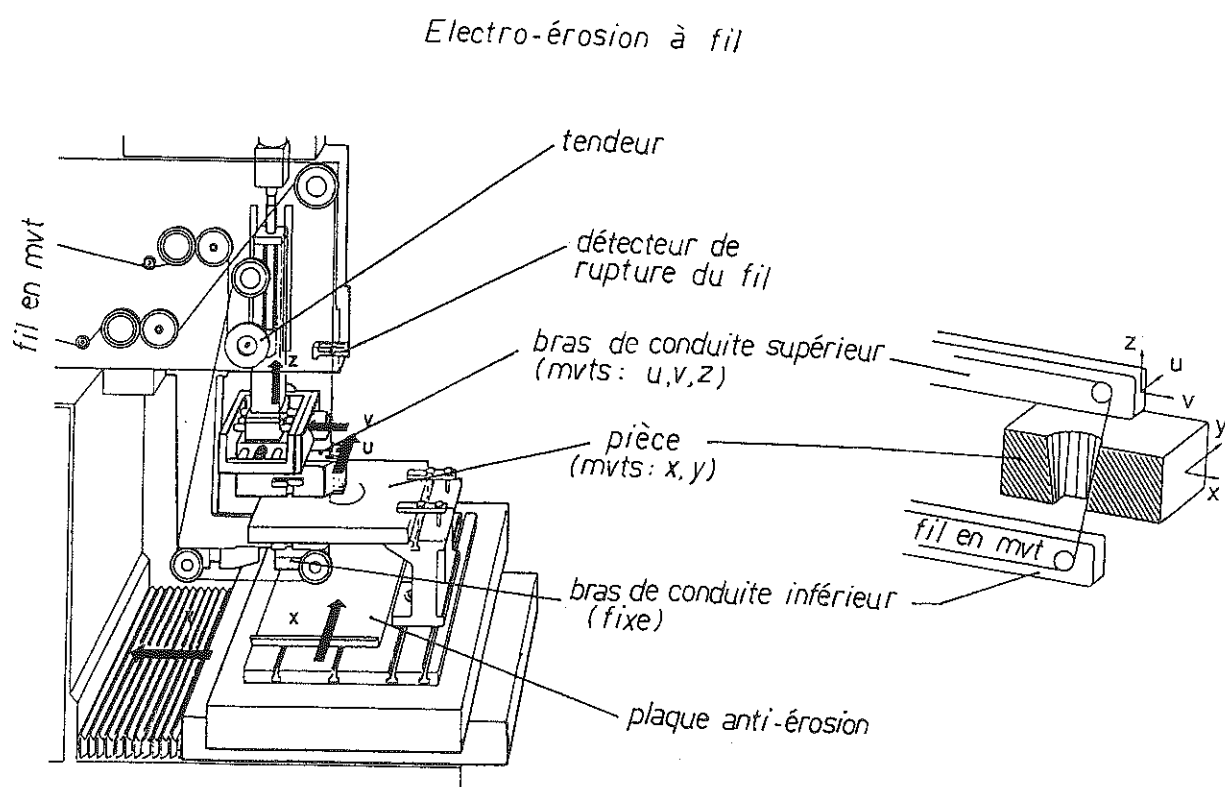
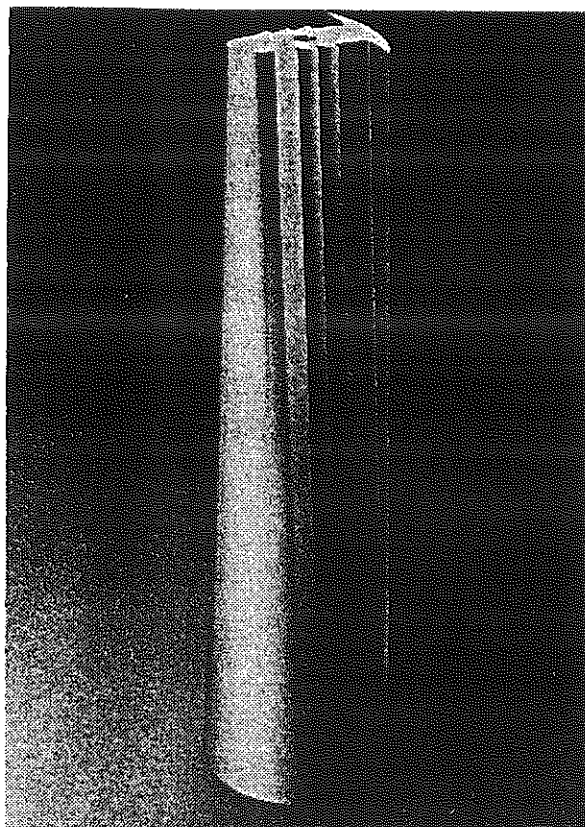


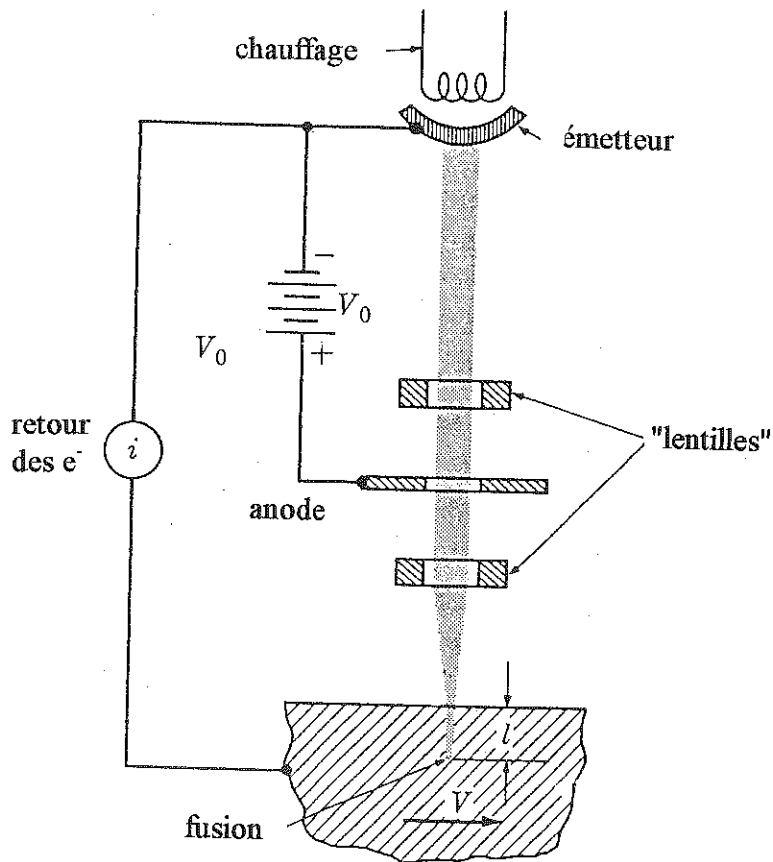
Fig. 313



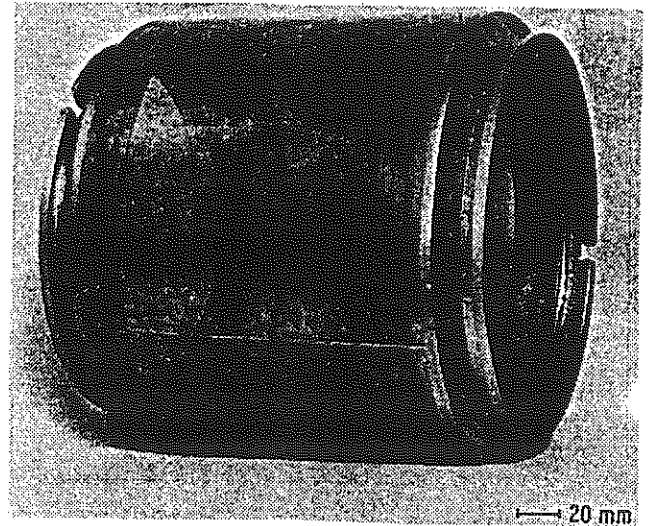
Noyau d'outil d'extrusion réalisé par électro-érosion à fil.
Hauteur : 250 mm.

L'outil complet a été réalisé en 19 h.

USINAGE PAR FAISCEAU D'ELECTRONS

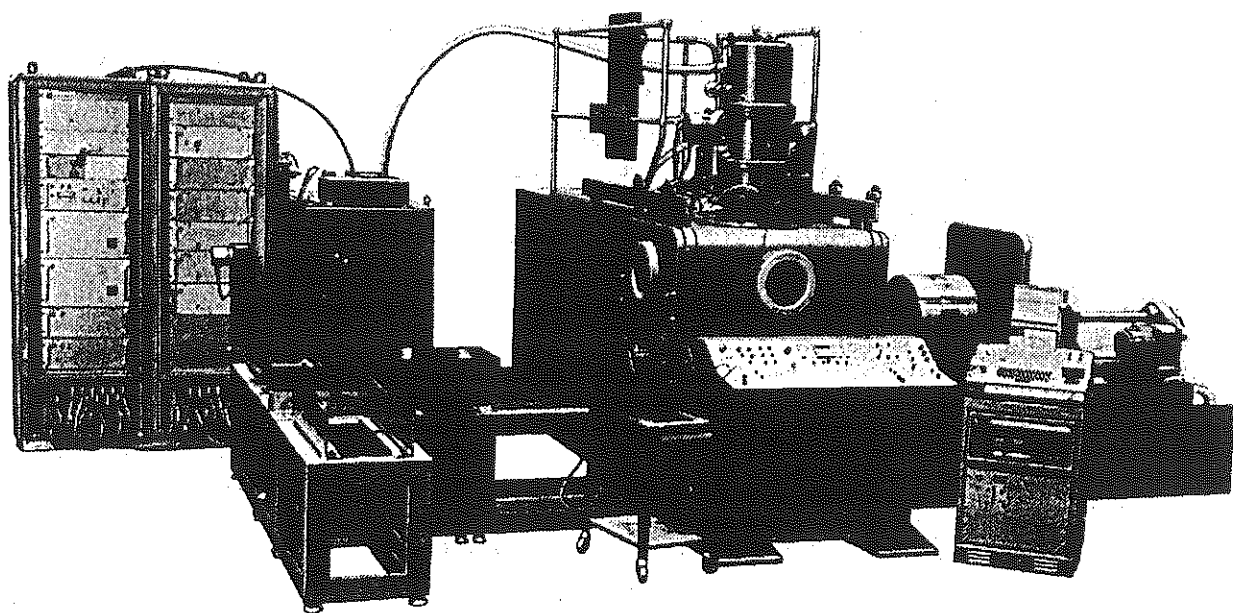


principe
Fig. 315



Filtre cylindrique perforé par faisceau d'électrons

Fig. 316



Installation de perforation par faisceau d'électrons

Fig. 317

Usinage par faisceau d'électrons (Electron-Beam Machining)

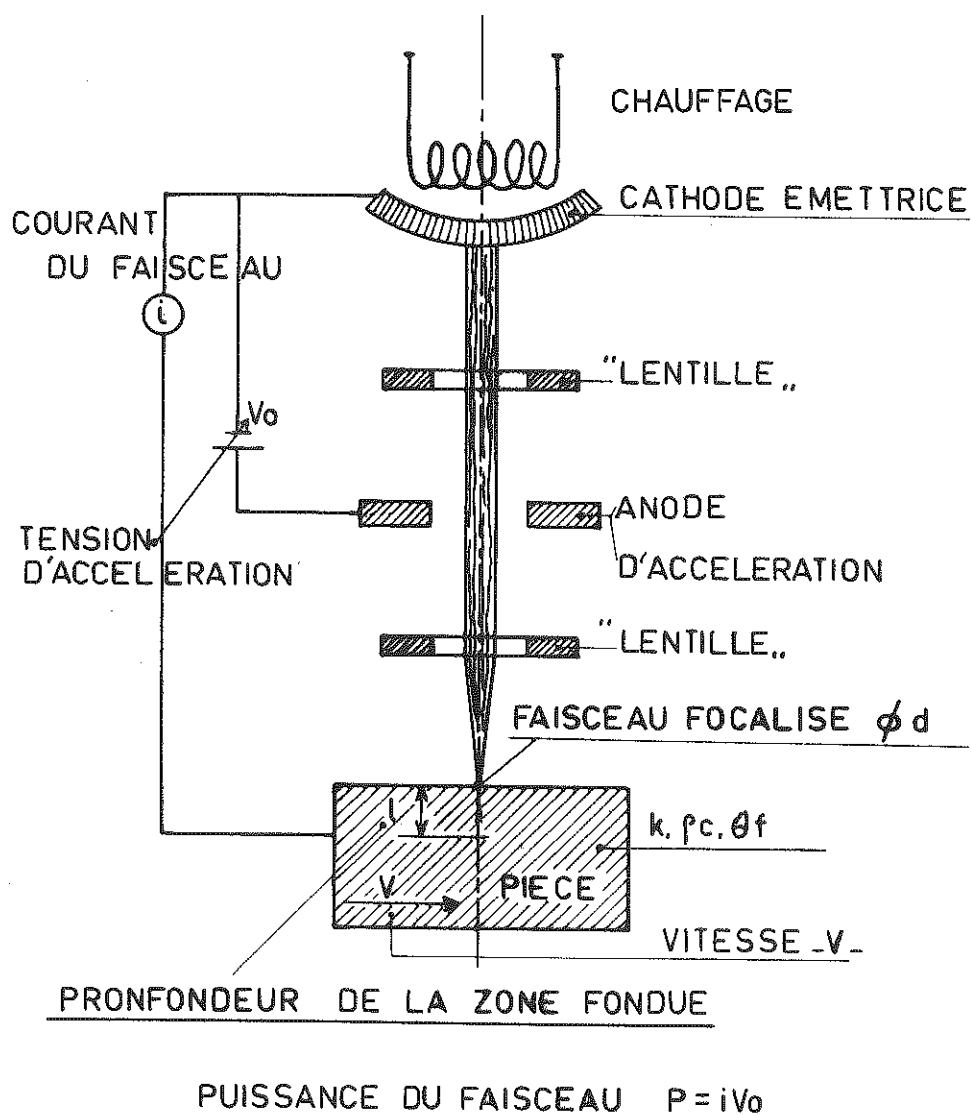


Fig. 318

Dans le vide !

Le faisceau apporte un échauffement local → fusion

Puissance du faisceau : $P = i V_0$

Grandeurs qui interviennent

1. Profondeur de pénétr.	l	L		
2. Puissance	P	W/T		
3. Vitesse d'avance	V	L/T		
4. Diamètre faisceau	d	L		
5. Conductivité	k	$\frac{W}{LTH}$	$\dot{Q} = k S \frac{d\theta}{dx}$	$\frac{W}{T} = [k] H L$
6. Chaleur volumique	ρc	W/L ³ H		
7. Température de fusion	θ_f	H		

7 grandeurs, 4 unités fond → 3 nb sans dim. Nous choisirons comme variables indépendantes l, d, θ_f .

$$\pi_1 = l P^{x_1} V^{x_2} k^{x_3} \rho c^{x_4}$$

$$[\pi_1] = L \frac{W^{x_1}}{T^{x_1}} \frac{L^{x_2}}{T^{x_2}} \cdot \frac{W^{x_3}}{L^{x_3} T^{x_3} H^{x_3}} \cdot \frac{W^{x_4}}{L^{3x_4} H^{x_4}}$$

$$W \rightarrow x_1 + x_3 + x_4 = 0$$

$$x_4 = -x_3$$

$$x_4 = 1$$

$$L \rightarrow 1 + x_2 - x_3 - 3x_4 = 0$$

$$x_1 = 0$$

$$T \rightarrow -x_1 - x_2 - x_3 = 0$$

$$x_2 = -x_3$$

$$x_2 = 1$$

$$H \rightarrow x_3 + x_4 = 0$$

$$1 - x_3 - x_3 + 3x_3 = 0$$

$$x_3 = -1$$

$$\pi_1 = \frac{V l \rho c}{k}$$

$$\pi_2 = d P^{x_1} V^{x_2} k^{x_3} (\rho c)^{x_4} : \text{même analyse } \pi_2 = \frac{V d \rho c}{k}$$

$$\pi_3 = \theta_f P^{x_1} V^{x_2} k^{x_3} (\rho c)^{x_4}$$

$$L \rightarrow x_2 - x_3 - 3x_4 = 0$$

$$T \rightarrow -x_1 - x_2 - x_3 = 0$$

$$1 - x_3 - x_3 - 3 + 3x_3 = -2 + x_3 = 0$$

$$W \rightarrow x_1 + x_3 + x_4 = 0$$

$$x_2 = -x_1 - x_3 = 1 - x_3$$

$$H \rightarrow 1 - x_3 - x_4 = 0 \quad x_1 = -1; x_4 = 1 - x_3$$

$$x_3 = 2$$

$$x_2 = 1 - x_3 = -1$$

$$x_4 = -1$$

$$x_1 = -1$$

$$\pi_3 = \frac{\theta_f k^2}{P V \rho c}$$

On a donc

$$\frac{Vl\rho c}{k} = f\left(\frac{Vd\rho c}{k}, \frac{\theta_f k^2}{PV\rho c}\right)$$

L'expérience montre que si P varie seul, l est proportionnel à P. Donc

$$\frac{Vl\rho c}{k} = \frac{PV\rho c}{\theta_f k^2} \cdot f'\left(\frac{Vd\rho c}{k}\right)$$

On a donc,

$$\frac{\theta_f lk}{P} = f'\left(\frac{Vd\rho c}{k}\right)$$

Expérimentalement,

$$\frac{\theta_f lk}{P} = 0,1 \left(\frac{Vd\rho c}{k}\right)^{-1/2} \dots\dots\dots \frac{P}{\theta_f lk} = 10 \sqrt{\frac{Vd\rho c}{k}}$$

$$P = 10\theta_f l \sqrt{Vdk\rho c}$$

↓

Pour une puissance donnée, l ↓ si s ↑, d ↑.

Applications : fabrication semi-conducteurs
micro-usinage

DECOUPAGE AU LASER

Laser : principe semblable, mais faisceau laser.

Pas besoin de travailler dans le vide.

Applications : découpage, perçage, traitement thermique.

↓
mat. difficiles à usiner : W, Ti, Al, diamant...

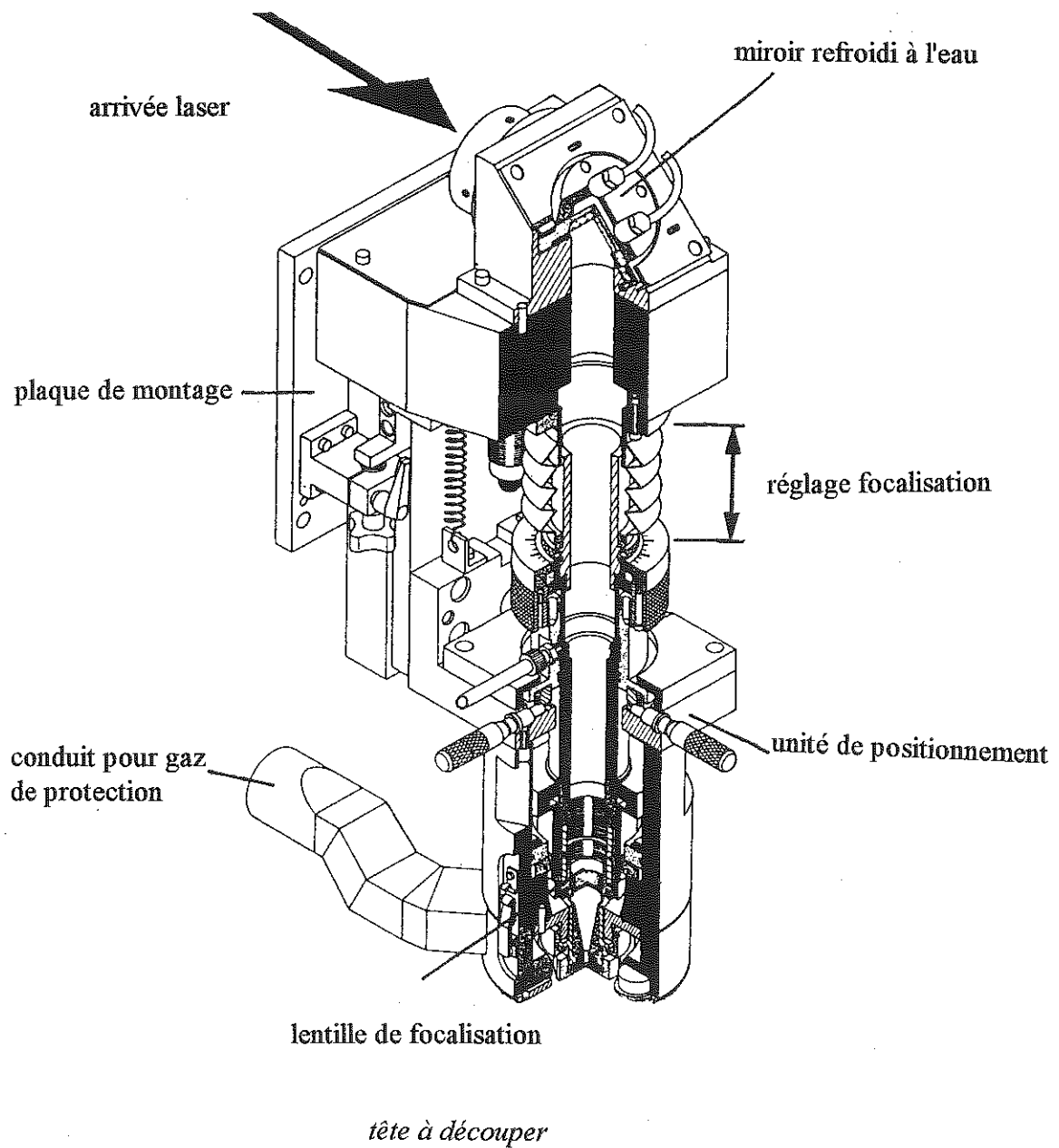


Fig. 319

DECOUPAGE AU LASER

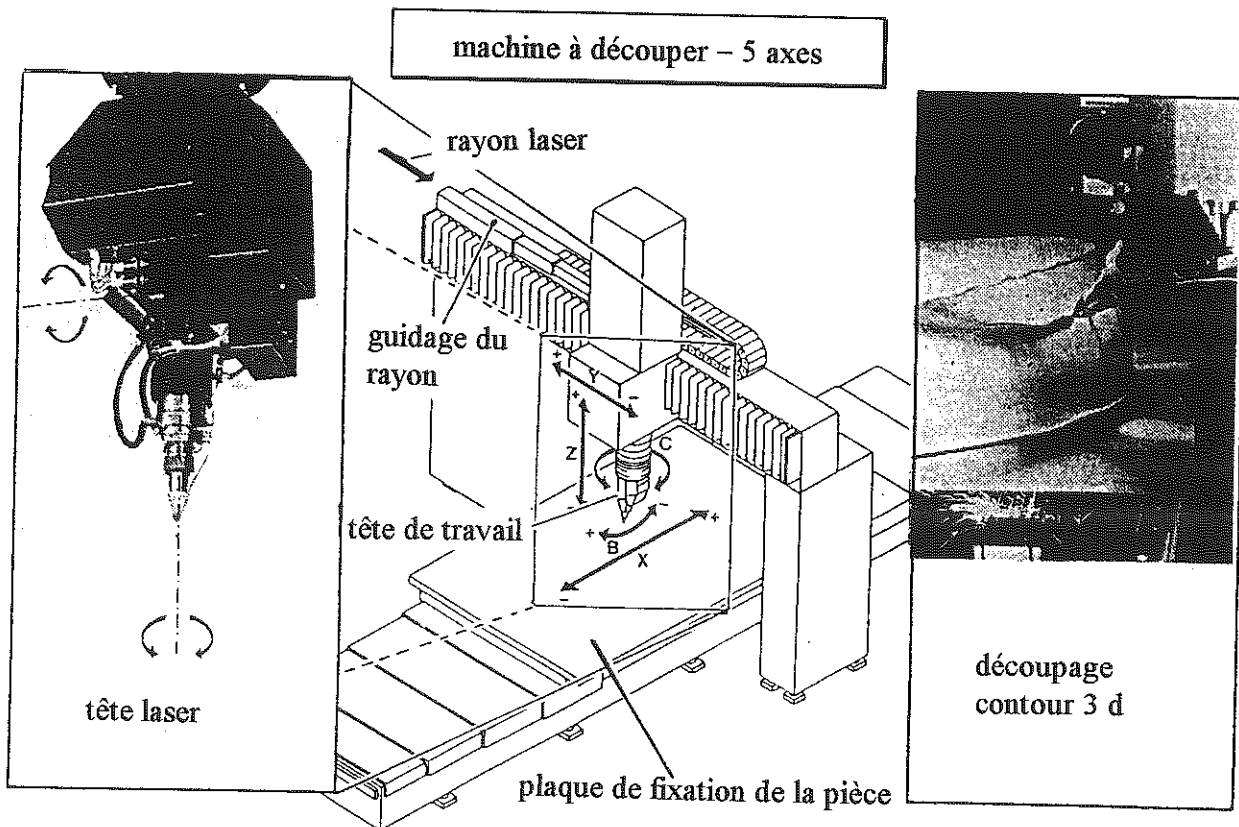
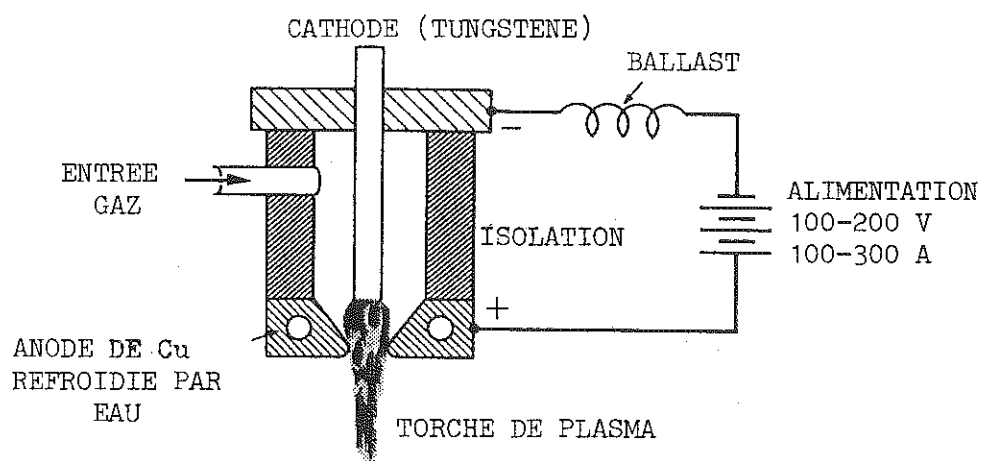


Fig. 320

DECOUPAGE AU PLASMA



Applications : découpage tôles de grande épaisseur

Fig. 321

DECOUPAGE AU JET D'EAU

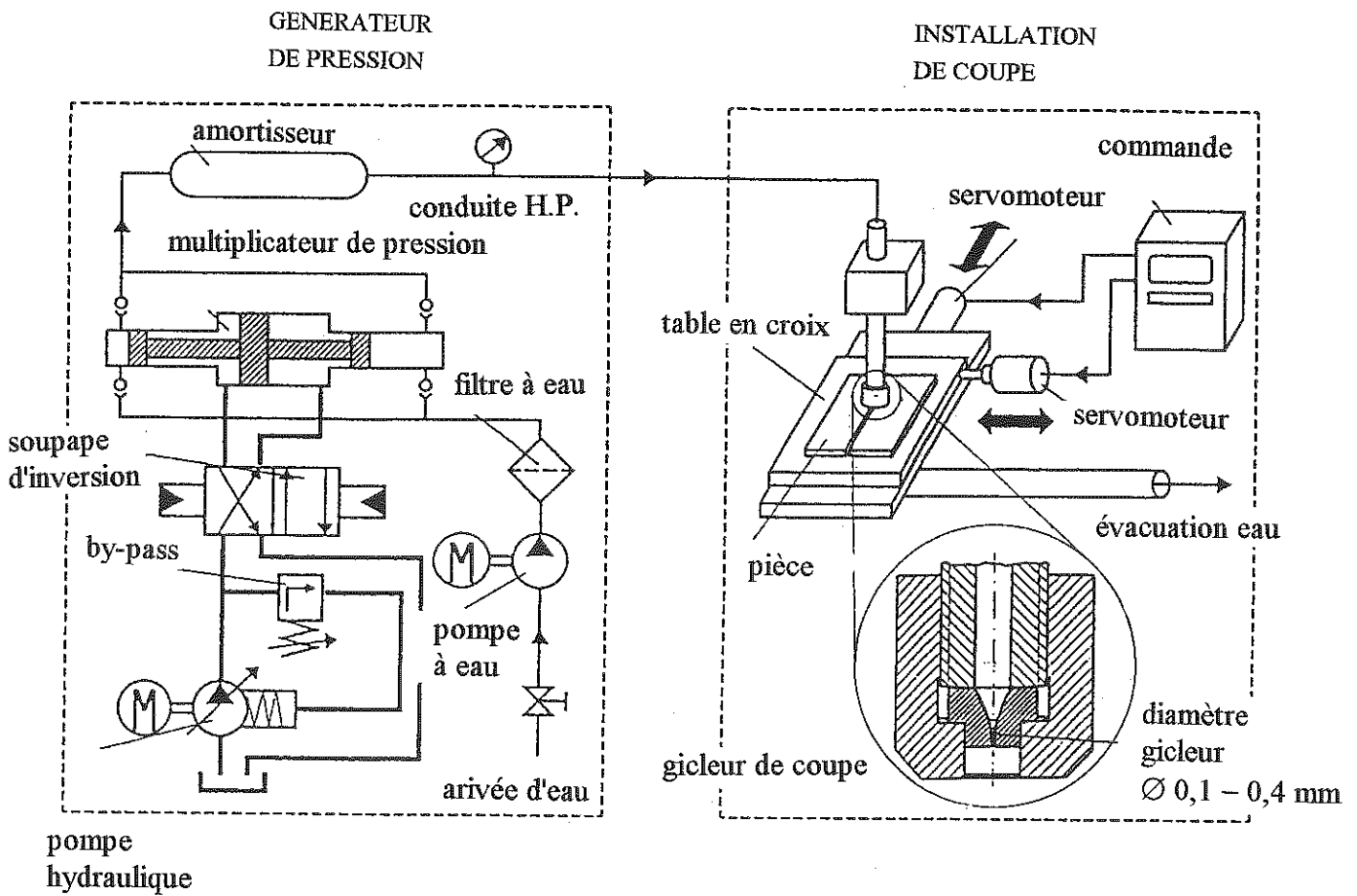


Fig. 322

Découpage au jet d'eau

1. Le principe est de produire un jet d'eau à très grande vitesse. On arrive actuellement à produire une pression de 400 MPa. Il y correspond une vitesse théorique donnée par

$$\frac{p}{\rho} = \frac{v^2}{2},$$

soit

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \cdot 10^6}{1000}} = 894,4 \text{ m/s}.$$

L'énergie de ce jet permet la coupe de divers matériaux relativement tendres. Le découpage des tissus et des mousses, notamment, se fait bien par ce procédé alors qu'en coupe mécanique, ces matériaux sont répartis aux outils.

2. Production de la pression. Pour obtenir une telle pression, on travaille en deux étages. On produit d'abord de l'huile sous une pression moindre; puis, à l'aide d'un système à tiroirs, on conduit cette huile dans un dispositif multiplicateur de pression, qui est une pompe à double effet où l'huile travaille sur une plus grande surface que l'eau. La fluctuation de pression est amortie dans un réservoir accumulateur.

3. Installation de coupe. La pièce, placée sur une table à mouvements croisés, peut se présenter en chacun de ses points devant le gicleur. On peut ainsi obtenir toute espèce de forme de découpe.

4. Etude théorique élémentaire

Le jet d'eau apporte une énergie cinétique spécifique $\frac{v_1^2}{2}$, à laquelle correspond la puissance

$$G_{eau} \frac{v_1^2}{2},$$

où G_{eau} est le débit massique de l'eau. A la sortie de la pièce, il sort de l'eau et des copeaux à la vitesse v_2 , ce qui équivaut à une puissance

$$\left(G_{eau} + G_{cop}\right) \frac{v_2^2}{2}$$

La différence entre ces deux puissances est la puissance de coupe :

$$G_{eau} \frac{v_1^2}{2} = \left(G_{eau} + G_{cop}\right) \frac{v_2^2}{2} + P_{coupe}$$

Généralement, on s'arrange pour que la vitesse de sortie soit petite devant la vitesse d'entrée. Comme le débit de copeaux est toujours d'un ordre de grandeur inférieur au débit d'eau, on peut négliger le premier terme du second membre et écrire

$$G_{eau} \frac{v_1^2}{2} \approx P_{coupe}$$

Mais le paramètre directement mesurable n'est pas v_1 mais la pression avant le gicleur. En l'absence de pertes, on aurait

$$v_1 = \sqrt{\frac{2p}{\rho}},$$

en négligeant l'effet de compressibilité de l'eau. Nous écrirons comme les hydrauliciens

$$v_1 = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad \varphi < 1,$$

de manière à tenir compte de la perte de charge. Le débit massique est alors

$$G_{eau} = \rho S v_1 = \rho S \varphi \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{1/2},$$

ce qui permet d'écrire le bilan énergétique sous la forme

$$\frac{1}{2} \rho S \varphi^3 \left(\frac{2p}{\rho} \right)^{3/2} \approx P_{coupe}$$

soit

$$p = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{2 P_{coupe}}{\rho S \varphi^3} \right)^{2/3}$$

Explicitons à présent P_{coupe} . Nous écrirons

$$P_{coupe} = Q_{copeaux} \cdot k_s$$

en faisant apparaître l'énergie spécifique de coupe k_s . Quant au débit, si d_j est le diamètre du jet, t l'épaisseur de la pièce, et v_f la vitesse d'avance, il est donné par

$$Q_{copeaux} = d_j t v_f.$$

Enfin, comme

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

avec

$$d = \text{diamètre gicleur} = \beta d_j, \beta < 1,$$

on obtient

$$p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{2 d_j t v_f}{\rho \varphi^3 \frac{\pi d^2}{4}} \right)^{2/3} k_s^{2/3} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{8 d t v_f}{\rho \varphi^3 \beta \pi d^2} \right)^{2/3} k_s^{2/3}$$

soit

$$p = 2 \rho^{1/3} \left(\frac{1}{\pi \varphi^3 \beta} \right)^{2/3} \left(v_f \frac{t}{d} \right)^{2/3} k_s^{2/3}.$$

En admettant que k_s ne dépend pas de t , d , v_f , on constate que la pression doit être proportionnelle à la puissance 2/3 du groupement

$$v_f \frac{t}{d}$$

Ceci correspond assez bien aux données expérimentales de König quant à la dépendance de p par rapport à t , pour les *caoutchoucs*, les *polycarbonates*, le *bois*, le *fibro-ciment*, le *polyester expansé*, le *plomb*. Pour les autres métaux, ses expériences donnent

$$p \# t^x \quad x = 0,3 \dots 0,5$$

ce qui semble indiquer que

$$(k_s t)^{2/3} \# t^x$$

soit

$$k_s \# t^{\frac{3}{2}x-1} \quad \frac{3}{2}x - 1 = (-0,55) \dots (-0,25)$$

Mais on est limité à environ 2 mm d'épaisseur pour les tôles d'acier ou d'Al. On peut également découper les roches au jet d'eau.

Bibliographie - Procédés non traditionnels

1. N.H. COOK : *Manufacturing Analysis*. Addison - Wesley, Reading, Massachusetts, 1966.
2. A.E. DE BARR, D.A. OLIVIER : *L'usinage électrochimique*. Eyrolles, Paris, 1971.
3. W. KOENIG : *Fertigungsverfahren - Band 3 : Abtragen*. VDI, Düsseldorf, 1979.
4. K.P. RAJURKAR, G. SATHYANARAYANAN R. KOMANDURI : *Advances in Non-Traditional Machining*. Ped-Vol. 22, A.S.M.E., New York, 1986.
5. R.A. TIKHOMIROV *et al.* : *High Pressure Jetcutting*. A.S.M.E. Press, New York, 1992.
6. *Guide des usinages par électro-érosion*. CETIM et ENIMS, 1980.
7. *L'électro-érosion aujourd'hui*. SOFETEC, Boulogne Billancourt.

PROCEDES INDUSTRIELS DE MISE A FORME

TABLE DES MATIERES

1. GENERALITES	2
1. PROCESSUS D'INDUSTRIALISATION D'UN PRODUIT.....	2
2. FABRICATION PROPREMENT DITE.....	3
3. COMMUNICATION ENTRE SERVICE.....	4
2. SIDERURGIE. CLASSIFICATION DES ALLIAGES	6
FONCTIONNEMENT DU HAUT-FOURNEAU.....	8
1. FONCTIONNEMENT DU HAUT FOURNEAU.....	8
2. PROPRIÉTÉS DES MÉTAUX.....	17
3. CLASSIFICATION DES ACIERS.....	20
4. DÉSIGNATION AFNOR DES ALLIAGES.....	23
3. FONDERIE	28
FONDERIE.....	29
1. LE MOULE.....	29
2. TECHNIQUE DE FABRICATION DU MOULE.....	29
3. ACCESSOIRES POUR LA FABRICATION DU MOULE.....	29
4. ÉTAPES DE LA FABRICATION DU MOULE.....	31
5. QUALITÉS DES SABLES.....	33
6. ORIGINE DU SABLE.....	33
7. ÉVACUATION DES GAZ.....	34
8. DÉTAIL DES OPÉRATIONS.....	35
9. NOYAUX.....	37
10. FAUSSE PARTIE.....	39
11. MOULAGE EN CHAPE.....	41
12. MOULAGE AU TROUSSEAU.....	43
13. LA COULÉE.....	46
13.1. Principe.....	46
13.2. Bassin de coulée.....	46
13.3. Coulée en pluie (FON 10) → pièces de grande hauteur.....	46
13.4. Coulée en source et à talon.....	46
13.5. Talons superposes.....	46
14. MASSELOTTES.....	47
15. MOULAGE MÉCANIQUE.....	50
16. ESSAI DE COULABILITÉ.....	52
17. MOULAGE EN COUILLES.....	54
18. MOULAGE SOUS PRESSION.....	56
19. MOULAGE CENTRIFUGE.....	56
20. CUBILOT.....	58
21. MOULAGE À CIRE PERDUE (FONDERIE FINE).....	60

22. CALCUL DES FORCES SOULEVANT LE DESSUS	61
22.1. <i>En l'absence de noyau; joint plat</i>	61
22.2. <i>Pas de noyau, joint gauche</i>	61
22.3. <i>Effet du noyau : ajouté la poussée d'Archimède</i>	61
23. OPÉRATIONS APRÈS MOULAGE.....	62
24. ÉPAISSEUR MINIMALE DES PIÈCES EN FONDERIE.....	63
25. RÈGLES DE DESSIN DES PIÈCES MOULÉES.....	64
25.1. <i>Règles liées au retrait</i>	64
25.2. <i>Règles liées à la résistance à la traction</i>	66
BIBLIOGRAPHIE - FONDERIE	67

4. FORGE

68

FORGEAGE	69
1. FORGEAGE : DÉFINITION.....	69
2. PROPRIÉTÉ.....	69
3. DÉFORMATIONS LOGARITHMIQUES	77
4. RÉPARATION DES FIBRES.....	79
5. RÉALISATION DU FORGEAGE.....	79
6. PÉNÉTRATION DE LA PLASTICITÉ	81
7. INFLUENCE DES FROTTEMENTS.....	83
8. CHOIX DE LA TEMPÉRATURE DE REFOULEMENT POUR UN ACIER	85
9. BILLETES ET LINGOTS.....	87
10. MARTEAUX ET PRESSES.....	89
10.1. <i>Marteau-pilon à air comprimé</i>	89
10.2. <i>Marteau-pilon à double montant</i>	90
10.3. <i>Efficacité théorique d'un marteau-pilon</i>	91
10.4. <i>Presse hydraulique</i>	95
11. RETREINT	96
11.1. <i>Définition</i>	96
11.2. <i>Procédé</i>	97
11.3. <i>Flambement</i>	98
11.4. <i>Illustration</i>	98
11.5. <i>Outillage de rétreint</i>	99
12. REFOULAGE	102
12.1. <i>Méthode traditionnelle</i>	102
12.2. <i>Refoilage des têtes de boulons ou de rivets</i>	102
12.3. <i>Les règles de E.R. FROST</i>	104
13. PERÇAGE	107
13.1. <i>Perçage des pièces épaisses</i>	107
13.2. <i>Perçage des pièces minces</i>	107
14. BIGORNAGE	108
15. TRANCHAGE	110
16. DÉPORTAGE OU DÉGORGEAGE	111
17. PLAGAGE	112
18. TORSION.....	115
19. ESTAMPAGE	118
BIBLIOGRAPHIE - FORGEAGE	135
20. TREFILAGE	126
20.1. <i>Définition</i>	126
20.2. <i>Opérations préliminaires</i>	126
20.3. <i>Coefficients caractéristiques</i>	126
20.4. <i>Limitations du procédé</i>	126
21. FILAGE À LA PRESSE (EXTRUSION)	129
22. ROULAGE DES FILETS	131
23. ESTAMPAGE À FROID	132

5. TRAVAIL DES MÉTAUX EN FEUILLES

136

TRAVAIL DES MÉTAUX EN FEUILLES	136
1. DÉCOUPAGE.....	136
2. POINÇONNAGE.....	143
2.1. <i>Emporte-pièce</i>	143
2.2. <i>Travail au poinçon</i>	143
2.3. <i>Bossages et évidements</i>	144
2.4. <i>Extracteur</i>	144
2.5. <i>Dépouille</i>	145
2.6. <i>L'effort de poinçonnage</i>	146
2.7. <i>Limitation due au flambement</i>	146
2.8. <i>Poinçonnage de rondelles creuses</i>	148
3. PLIAGE.....	149
3.1. <i>Rayon du poinçon</i>	149
3.2. <i>Effort</i>	149
3.3. <i>Retour élastique</i>	150
3.4. <i>Illustrations</i>	152
3.5. <i>Profilage</i>	158
4. CINTRAGE.....	160
4.1. <i>Réalisation</i>	160
4.2. <i>Cintrage des tubes</i>	161
4.3. <i>Cintrage de profilés</i>	162
5. EMBOUTISSAGE.....	163
5.1. <i>Définition</i>	163
5.2. <i>Exemple</i>	164
5.3. <i>Évaluation des efforts</i>	166
5.4. <i>Diamètre du flan</i>	167
5.5. <i>Rayon de la matrice</i>	167
5.6. <i>Rayon du poinçon</i>	168
5.7. <i>Jeu entre le poinçon et la matrice</i>	168
5.8. <i>Propriétés mécaniques des outils</i>	168
5.9. <i>Presse à bielle et manivelle</i>	169
5.10. <i>Défauts des pièces embouties</i>	170
5.11. <i>Emboutissage cylindrique profond</i>	171
5.12. <i>Emboutissage conique</i>	172
5.13. <i>Pièces hémisphériques</i>	173
5.14. <i>Pièces prismatiques</i>	174
6. REPOUSSAGE AU TOUR.....	175
6.1. <i>Définition</i>	175
6.2. <i>Comparaison emboutissage et repoussage</i>	177
6.3. <i>Gamme de fabrication d'un couvercle à bouton</i>	178
6.4. <i>Casserie</i>	181
6.5. <i>Bordage</i>	182
6.6. <i>Bordage pour tôles planes</i>	183
7. AGRAFAGE.....	184
8. FORMAGE À HAUTE ÉNERGIE.....	185
BIBLIOGRAPHIE - MÉTAUX EN FEUILLES.....	186

6. SOUDAGE, BRASAGE & OXYCOUPAGE

187

SOUDAGE, BRASAGE, OXYCOUPAGE.....	187
1. DÉFINITION.....	187
2. SOUDAGE AU CHALUMEAU.....	187
2.1. <i>Source</i>	187
2.2. <i>Examen de la flamme</i>	187
2.3. <i>Chalumeau</i>	188
2.4. <i>Soudage à gauche et soudage à droite</i>	189
2.5. <i>Diamètre de la baguette d'apport</i>	189
2.6. <i>Contraintes résiduelles</i>	189
2.7. <i>Stockage des gaz</i>	190
2.8. <i>Production directe de l'acétylène</i>	191
3. SOUDAGE À L'ARC MANUEL.....	192
3.1. <i>Définition</i>	192
3.2. <i>Caractéristique électrique de l'arc</i>	192
3.3. <i>Constante de fusion d'une électrode</i>	193
3.4. <i>Caractéristique du générateur de tension</i>	193
3.5. <i>Générateur à courant constant</i>	194
3.6. <i>Polarité</i>	195
3.7. <i>Soudage en courant alternatif</i>	195
3.8. <i>Electrodes enrobées</i>	196
4. SOUDAGE TIG.....	198
5. SOUDAGE MIG (METAL INERT GAS).....	200
5.1. <i>Définition</i>	200
5.2. <i>Autorégulation</i>	200
6. SOUDAGE MAG (METAL ACTIVE GAS).....	201
7. LE SOUDAGE SOUS FLUX SOLIDE.....	202
8. SOUDURES PAR POINTS.....	203
9. SOUDAGE AU GALET.....	205
10. SOUDAGE EN BOUT PAR RÉSISTANCE.....	205
11. SOUDAGE EN BOUT PAR ÉTINCELAGE.....	205
12. SOUDAGE PAR FROTTEMENT.....	206
13. BRASAGE.....	207
13.1. <i>Définition</i>	207
13.2. <i>Mouillage</i>	207
13.3. <i>Résistance mécanique</i>	208
13.4. <i>Brasures courantes</i>	208
14. OXYCOUPAGE.....	209
14.1. <i>Définition</i>	210
14.2. <i>Application</i>	210
BIBLIOGRAPHIE - SOUDAGE, BRASAGE, OXYCOUPAGE.....	212

7. METALLURGIE DES POUDRES

213

NOTIONS DE MÉTALLURGIE DES POUDRES.....	213
1. PRODUCTION DES POUDRES.....	213
2. MÉLANGE DES POUDRES.....	213
3. TRAITEMENT.....	213
3.1. <i>Compactage</i>	213
3.2. <i>Frittage</i>	213
3.3. <i>Pressage</i>	213
4. FACTEURS D'INFLUENCE.....	214
5. CLASSIFICATION DES PRODUITS FRITTÉS.....	214

PROCÉDÉS SPÉCIAUX D'USINAGE.....	215
---	------------

8. PROCEDES SPECIAUX D'USINAGE 215

USINAGE AUX ULTRASONS	217
------------------------------------	------------

1. DÉFINITION.....	217
2. ASSERVISSEMENT.	218
3. MODÉLISATION ÉLÉMENTAIRE.....	218
3.1. <i>Coefficient de concentration des grains</i>	218
3.2. <i>Analyse dimensionnelle</i>	219
4. APPLICATIONS.....	223

SONOTRODE	224
------------------------	------------

USINAGE ÉLECTROCHIMIQUE	230
--------------------------------------	------------

1. HISTORIQUE.....	230
2. RÉACTION.....	230
3. LOI DE FARADAY : IL FAUT UN FARADAY, SOIT.....	230
4. COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE.....	231
5. ÉNERGIE SPÉCIFIQUE BRUTE.....	231
6. ISOLATION DE L'OUTIL : NÉCESSAIRE POUR FORER UN TROU CYLINDRIQUE.	231
7. DISPOSITIONS PRATIQUES.....	231

ELECTRO-ÉROSION	234
------------------------------	------------

1. DÉFINITION.....	234
2. MISE EN OEUVRE.....	234
3. FONCTIONNEMENT DE L'ÉTINCELLE.....	235
4. ASSERVISSEMENT DU GAP.....	237
5. ELECTRO-ÉROSION PLANÉTAIRE.....	238
6. FORMES COMPLEXES.....	239
7. ELECTRO-ÉROSION À FIL.....	240

USINAGE PAR FAISCEAU D'ÉLECTRONS (ELECTRON-BEAM MACHINING)	243
---	------------

DÉCOUPAGE AU LASER.....	246
--------------------------------	------------

DÉCOUPAGE AU PLASMA.....	248
---------------------------------	------------

DÉCOUPAGE AU JET D'EAU	250
-------------------------------------	------------

1. PRINCIPE.....	250
2. PRODUCTION DE LA PRESSION.....	250
3. INSTALLATION DE LA COUPE.....	250
4. ETUDE THÉORIQUE ÉLÉMENTAIRE	250
BIBLIOGRAPHIE - PROCÉDÉS NON TRADITIONNELS	253